

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**

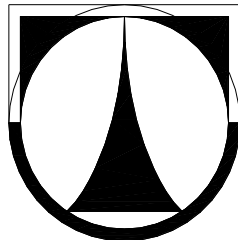
**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Liberec 2012

Bc. Barbora Meryová

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**



Průmyslový management- textil  
3106T014

**Měření intenzity vyzařování optických vláken**

**Measurement of light intensity of optical fibers**

**Bc. Barbora Meryová**

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková  
Konzultant diplomové práce: Ing. Vít Lédl, Ph.D.,

KHT - 121

Rozsah diplomové práce:

Počet stran: 77

Počet tabulek: 4

Počet obrázků: 56

Počet příloh: 4

Datum odevzdání : 9. 5. 2012

**(Zadání diplomové práce)**

## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 9. 5. 2012

.....

Podpis

## **Poděkování**

Děkuji paní **doc. Dr. Ing. Daně Křemenákové**, vedoucí katedry textilní technologie Technické univerzity v Liberci, za její odborný dozor a vedení při psaní této práce. Dále bych ráda poděkovala **Ing. Vítu Lédlovi, Ph.D.**, za jeho odborné vedení, cenné připomínky, vstřícnost, trpělivost a inspirativní návrhy související s řešením této diplomové práce.

Další osobou, které bych ráda touto cestou poděkovala za jeho ochotu a cenné rady, je **Mgr. Radek Melich**, který se významně podílel na tvorbě počítačových simulací.

Mé poděkování patří i rodičům za jejich psychickou podporu a důvěru, kterou mi poskytovali po celou dobu studia.

Poděkování patří i projektu FR-TI1/242 - Opticky aktivní bezpečnostní textilie, díky kterému mohla vzniknout tato práce.

Barbora Meryová

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce se zabývá světelnou intenzitou u stranově vyzařujících optických vláken v ohybu, v napřímeném stavu a vláken zakomponovaných do textilních struktur a výrobků. Popisuje možné ztráty vyslaného signálu u těchto vláken a možné způsoby měření těchto ztrát. Dále popisuje povrchové úpravy optických vláken zvyšující světelnou intenzitu v místě poškození. Navrhuje nové zařízení pro měření světelné intenzity u vláken napřímených a u vláken v ohybu. V práci je vytvořena metodika měření světelné intenzity napřímených optických vláken a vláken v ohybu. Provedeno je měření napřímených optických vláken ve vztahu k vzdálenosti od zdroje světla a měření ohnutých optických vláken při různých rádiusech ohybu. Na závěr jsou vytvořeny simulace implementovaných optických vláken do tkaniny.

## **Klíčová slova**

ohyb optického vlákna, optické vlákno, mikroohyb a makroohyb, světelná intenzita

## **Annotation**

This diploma thesis deals with luminous intensity of side emitting glass fibres in a bend and straight condition and also with fibres implemented in textile structures and products. It describes possible losses of the output signal and the way of adequate measuring of these losses. It also describes optical fibre's surfacing, which increases the luminous intensity level in the place of a defect. There is a new mechanism for measuring proposed. Methodology of luminous intensity measuring is suggested for straight optical fibres as well as for bend optical fibres with different radius level. The luminous intensity is measured according to the distance of light source. Finally simulations of optical fibres implemented into the fabric were created.

## **Key words**

bending the optical fiber, optical fiber, micro-bending and macro-bending, light intensity

**OBSAH**

ÚVOD .....	9
1. REŠERŠNÍ ČÁST.....	10
1.1. Základní přenosové parametry optických vláken .....	10
1.1.1 Index lomu .....	10
1.1.2 Totální odraz .....	11
1.1.3 Disperze světla .....	11
1.1.4 Šířka pásma .....	12
1.1.5 Světelná intenzita .....	12
1.1.6 Útlum vedeného signálu.....	13
1.2 Složení optických vláken.....	13
1.2.1 Druhy optických vláken .....	15
1.3 Měření parametrů optických vláken .....	17
1.3.1 Metody měření světelného útlumu.....	17
1.3.1.1 Metoda dvou délek .....	17
1.3.1.2 Metoda vložených ztrát .....	18
1.3.1.3 Metoda měření zpětného rozptylu .....	18
1.3.2 Metoda zjišťování šířky pásma .....	19
1.4 Faktory ovlivňující ztráty v optických vláknech .....	19
1.4.1 Materiálová absorpce .....	20
1.4.2 Materiálový rozptyl.....	20
1.4.2.1 Lineární rozptyl .....	20
1.4.2.2 Nelineární rozptyl.....	21
1.4.3 Ztráty ohybem .....	21
1.4.3.1 Makroohyb .....	22
1.4.3.2 Mikroohyb .....	24
1.5 Úpravy povrchu optických vláken.....	25
1.5.1 Mechanická úprava povrchu .....	26
1.5.2 Chemická úprava povrchu .....	27
1.5.2.1 Chemikálie pro úpravu povrchu .....	27
1.5.2.2 Barvení optických vláken.....	28
1.5.3 Termická úprava povrchu .....	28
1.6 Základní textilní pojmy .....	31

1.6.1 Zvlnění nití ve tkanině .....	31
1.6.2 Vazný bod .....	32
1.6.3 Deformace nití ve tkanině .....	33
1.6.4 Dostava tkaniny .....	33
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	34
2.1 Zabudování optických vláken do textilních struktur .....	34
2.1.1 Mikroohyb.....	34
2.1.1.1 Testování mikroohybu.....	34
2.1.1.2 Vznik mikroohybu ve tkanině .....	35
2.1.2 Makroohyb .....	37
2.1.2.1 Testování makroohybu .....	37
2.1.2.2 Vznik makroohybu v textilních strukturách.....	38
2.2 Návrhy metody měření světelné intenzity .....	39
2.2.1 Měření světelné intenzity napřímených optických vláken.....	39
2.2.1.1 Návrh zařízení pro měření světelné intenzity napřímených optických vláken	40
2.2.2 Měření světelné intenzity v místě ohybu optických vláken.....	40
2.2.2.2 Vlastní návrh zařízení pro měření optických vláken v ohybu.....	40
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	46
3.1 Metody měření.....	46
3.1.1 Metoda měření světelné intenzity napřímených optických vláken.....	47
3.1.2 Metoda měření světelné intenzity v místě ohybu optických vláken .....	48
3.2 Charakteristika měřených vláken .....	50
3.3 Výsledky měření.....	52
3.3.1. Výsledky měření napřímených optických vláken.....	52
3.3.2. Výsledky měření ohnutých optických vláken.....	56
3.3.3. Zhodnocení použitých metod.....	60
3.4 Simulace zvlnění nití ve tkanině.....	60
3.5.1 Výstup simulací .....	62
ZÁVĚR.....	67
Seznam použité literatury .....	69
Seznam příloh.....	77



## ÚVOD

Diplomová práce vznikla na základě projektu FR-TI1/242-Opticky aktivní bezpečnostní textilie. Projekt, stejně tak jako diplomová práce, je zaměřen na využití stranově vyzařujících optických vláken v textilním průmyslu. Téma práce bylo zvoleno vzhledem k návaznosti na mou bakalářskou práci, která se zabývala měřením světelné intenzity na povrchu napřímených stranově vyzařujících optických vláken. Na základě poznatků získaných při zpracování bakalářské práce je diplomová práce věnována hlavně měření světelné intenzity u optických vláken v ohybu a zdokonalení měření světelné intenzity u optických vláken v napřímeném stavu.

Hlavním cílem diplomové práce je vytvořit nové metody a způsoby měření světelné intenzity u optických vláken v ohybu, v napřímeném stavu a u optických vláken zakomponovaných do textilních struktur. Pro příslušná měření je potřeba navrhnout nová zařízení a metody měření světelné intenzity na povrchu stranově vyzařujících optických vláken.

Práce je členěna do tří hlavních částí. Rešeršní část popisuje možné ztráty vyslaného signálu a způsoby měření těchto ztrát. Dále popisuje všeobecná pravidla platící pro ztráty v optických vláknech a jejich způsoby zjištění. Jsou zde popsány i základní optické a textilní pojmy. V této části je také popis povrchových úprav optických vláken zvyšující světelnou intenzitu na povrchu vláken v místě poškození.

V teoretické části jsou blíže specifikovány mikro a makro ohyby, které vznikají zakomponováním optických vláken do textilních struktur. Popsány jsou normované způsoby měření ztrát vyslaného optického signálu zapříčiněné mikro a makro ohybem. Dále je v této části proveden návrh zařízení pro měření světelné intenzity na povrchu napřímených optických vláken. Jsou provedeny vlastní koncepční návrhy zařízení pro měření světelné intenzity na povrchu optických vláken v ohnutém stavu. Uvedeny jsou také ukázky vzniku makro ohybu v textilních výrobcích.

Experimentální část je věnována vytvoření a popisu metodiky měření světelné intenzity vláken napřímených a ohnutých pro navržená zařízení. Dále popisuje vytvoření počítačových simulací ohybu optických vláken zakomponovaných ve tkanině. Tyto simulace demonstrují místo a velikost světelné intenzity v závislosti na velikosti zvlnění. Na závěr kapitoly jsou provedeny výpočty měrného útlumu, který vyplývá z naměřených dat.

Získané výsledky, poznatky a z toho plynoucí doporučení jsou shrnuty v závěru diplomové práce.

## 1. REŠERŠNÍ ČÁST

V této části práce jsou blíže popsány základní parametry optických vláken, základní faktory, které ovlivňují útlum a metody měření útlumu optických vláken. Dále jsou zde uvedeny způsoby úprav povrchu optických vláken.

### **1.1. Základní přenosové parametry optických vláken**

Níže uvedené přenosové parametry mají hlavní vliv na šíření signálu v optickém vlákně. Jejich znalost je důležitá pro měření vlastností optického vlákna. Vhodné přenosové parametry optického vlákna mohou minimalizovat ztráty vedeného světelného signálu, nebo také způsobit vyzařování světelného signálu na povrchu optického vlákna. Mezi nejdůležitější přenosové parametry patří index lomu, disperze světla a útlum vedeného signálu, atd.

#### ***1.1.1 Index lomu***

Index lomu  $n$  je bezrozměrná fyzikální veličina, která vyjadřuje změnu rychlosti šíření světla a všeobecně elektromagnetického vlnění při přechodu mezi různými prostředími [1]. U průhledných a čirých látek lze index lomu považovat za konstantu, která se vztahuje k celému rozsahu viditelného světla. Jedná se o tzv. absolutní index lomu. V tomto případě je index lomu vždy větší než 1 a je udán rovnicí (1). [1]

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost šíření světla ve vakuu ( $3 \cdot 10^8$  m/s), a  $v$  je rychlost šíření světla v dané látce.

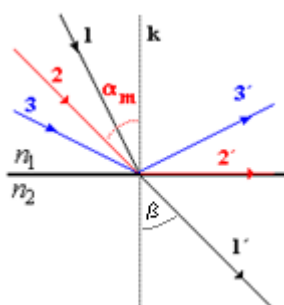
Relativní index lomu  $n_{12}$  je definován jako podíl přechodu z prostředí s indexem lomu  $n_1$  do prostředí s indexem lomu  $n_2$ . Tento vztah je vyjádřen v rovnici (2). [1]

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

### 1.1.2 Totální odraz

Světlo pohybující se hustým prostředím  $n_1$  a dopadající na rozhraní s prostředím řidším  $n_2$ , musí dopadat pod úhlem větším než je úhel mezní  $\theta$ . Je-li úhel dopadu větší než úhel mezní, pak je světlo úplně odraženo a nastane tzv. totální odraz. Tento efekt je žádoucí u tzv. koncově svítících optických vláken. U těchto vláken se vyžaduje, aby vedený signál zůstal v jádře optického vlákna. S rostoucím úhlem dopadu se zvětšuje i úhel lomu tzv. lom od kolmice. Při tzv. mezním úhlu dopadu  $\alpha_m$  ( $\beta = 90^\circ$ ), to je maximální úhel, při němž ještě nastane lom světla. Výše popsané efekty jsou na obr. 1. [2]

Aby došlo k totálnímu odrazu, musí být dodržena nejen rozdílná materiálová prostředí (různé indexy lomu jádra a pláště), ale i úhel vyslaného paprsku. Pokud paprsek dopadá na rozhraní při větším úhlu, lom světla již nenastává a dojde k tzv. totálnímu odrazu. Ten vzniká tehdy, je-li překročen mezní úhel dopadu signálu na hranici dvou prostředí s různými indexy lomu.[2]



Obr. 1 Princip odrazu světla v závislosti na úhlu dopadu [2]

1 – lom od kolmice, 2 – mezní úhel dopadu, 3 – totální odraz

### 1.1.3 Disperze světla

Disperze, nebo-li rozklad světla, je optický jev, při kterém dochází k rozkladu bílého světla na jednotlivé barevné složky. Rozklad světla je důsledkem závislosti velikosti rychlosti světla na jeho vlnové délce. Velikost rychlosti světla se zpravidla s rostoucí frekvencí zmenšuje. Jako příklad lze uvést situaci, kdy prochází bílé světlo vedené opticky řidším prostředím  $n_2$  do prostředí opticky hustšího  $n_1$ , kde jsou jeho okraje zbarvené. Viz obr. 2. [2]

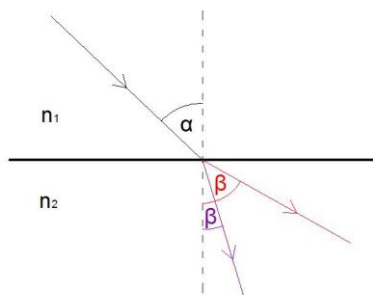
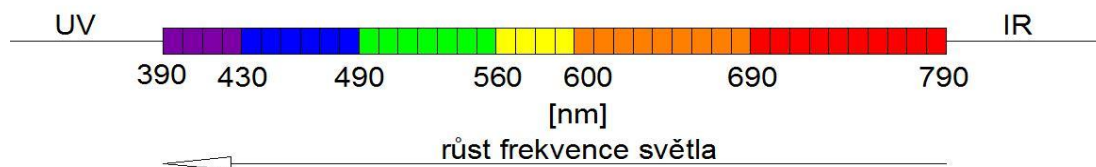
Obr. 2 Rozložení světelného paprsku způsobené přechodem z  $n_1 > n_2$  [2]

Schéma normální disperze je uvedeno na obr. 3. Světelné vlnění určité frekvence se nazývá monofrekvenční. Vlivem disperze světla se paprsky monofrekvenčního světla různých barev lámou pod různými úhly lomu. Nejvíce se láme paprsek fialového světla, nejméně pak paprsek světla červeného viz obr. 2. Disperze svědčí o tom, že bílé světlo je složeno z jednoduchých (barevných) světél, které již dále nelze rozložit. Každému monofrekvenčnímu světlu odpovídá určitá barva. [2].



Obr. 3 Schéma normální disperze [2]

### 1.1.4 Šířka pásma

Šířka pásma udává nejvyšší možný kmitočet vyslaného signálu, který bude spolehlivě přenesen do vzdálenosti 1 kilometru bez výrazného zkreslení signálu působením disperze. [3]

Šířku pásma ovlivňuje několik faktorů. Mezi ty nejvýznamnější patří samotná konstrukce optického vlákna. Mezi dalšími vlivy, které ovlivňují šířku pásma, je materiál, ze kterého je optické vlákno vyrobeno a vlnová délka vyslaného signálu. U stranově vyzařujících vláken je tato šířka pásma tak malá, že není blíže specifikována [3]

### 1.1.5 Světelná intenzita

Světelná intenzita je fotometrická veličina, která je definována jako světelný tok (tok energie) dopadající na určitou plochu. Je udána podílem světelného toku  $W$  a plochou  $m^2$ , na kterou světelný tok dopadá. [3].

### 1.1.6 Útlum vedeného signálu

Útlum představuje ztrátu vyslaného signálu, který je závislý na vzdálenosti od zdroje signálu. Útlum signálu závisí na vlnové délce a platí čím větší vlnová délka, tím větší ztráty. Útlum lze chápat jako měřítko ztráty optické energie ve vláknech.[4]

Pro měření světelného útlumu lze vycházet z rovnice (3), která popisuje pokles vyzařovaného výkonu  $P$  se vzdáleností od zdroje podél osy vlákna. [5]

$$P_z = P_0 \cdot 10^{-\alpha \cdot \frac{z}{10}} [W] \quad (3)$$

kde  $P_0$  je naměřený výkon světelné intenzity na začátku vlákna (u zdroje světla),  $P_z$  je výkon světelné intenzity ve vzdálenosti  $z$  od zdroje světla a  $\alpha$  je součinitel útlumu. [5]

K vyjádření vlastnosti daného vlákna používáme součinitele útlumu  $\alpha$  (4), který lze odvodit z rovnice  $P_z$ . [6]

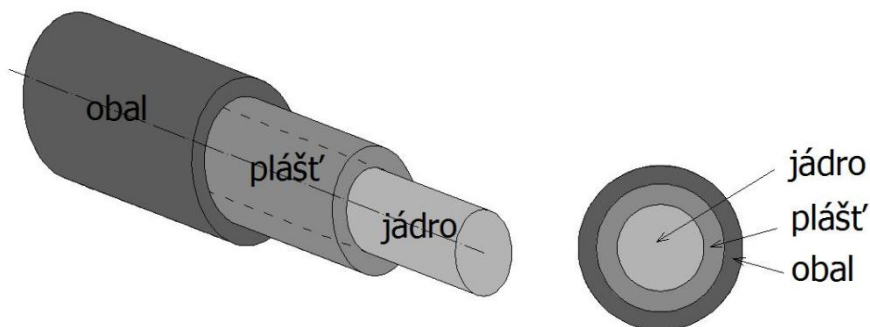
$$\alpha = \frac{-10}{z} \cdot \log_{10} \frac{P_z}{P_0} [dB/km] \quad (4)$$

Pro zjištění útlumu lze použít rovnici (5), která vychází ze základní definice decibelu a říká, že decibel je logaritmické měřítko dvou výkonů  $P_1$  a  $P_2$ .

$$\text{ÚD} = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} [dB] \quad (5)$$

## 1.2 Složení optických vláken

Optické vlákno umožňuje přenos signálu na určité vzdálenosti. K vedení signálu je zapotřebí, aby bylo dodrženo základního uspořádání ve vláknech. Na obr. 4 je uspořádání optických vláken, kde jádro je nejdůležitější částí, protože v něm je přenášen vyslaný signál. Plášť optického vlákna s jádrem vytváří rozhraní o vhodném indexu lomu, které umožňuje přenos vyslaného signálu na principu odrazu světla. Součástí konstrukce optického vlákna může být i obal, ten slouží jako ochrana optického vlákna před mechanickým a chemickým působením okolního prostředí. Obal se používá u koncově svítících optických vláken, tedy u vláken, které na povrchu nesvítí.



Obr. 4 Uspořádání optických vláken [3]

U optických vláken rozlišujeme přenosové a konstrukční vlastnosti. Mezi nejdůležitější přenosové vlastnosti patří disperze a útlum. A mezi konstrukční parametry patří příčné rozměry vlákna a rozložení indexů lomu.[7]

Klasické uspořádání jádro - plášť nemusí být vždy dodrženo, a to u vláken gradientních. Zde jsou jednotlivé materiály v sobě rozpuštěny. Tím je dosaženo gradientního profilu indexu lomu. Díky tomu se světlo v těchto vláknech nešíří za pomoci totálního odrazu, jak už bylo výše zmíněno, ale za pomoci ohybu světla.[8]

Plášť na optických vláknech nemusí být pouhým okem vidět. To platí u vláken, kde je plášť na jádro nanesen pouze v tenké vrstvě. Tato vlákna vyrábí například Čínská firma Grace, Hypof.

Stranově vyzařující optická vlákna je možné při výrobě upravovat tak, aby se zvýšila jejich světelná intenzita. Možnosti úprav jsou:

- příměs mikrokrystallů přímo do směsi, ze které je vlákno vydlouženo,
- mechanické nebo chemické narušení povrchu vlákna,
- výroba ze speciálních polymerů, které mají výrazný rozdíl v indexech lomu.

Tyto úpravy se nepříznivě projeví na ceně takto vyrobených optických vláken. Další negativní vliv mají mechanické a chemické úpravy, které snižují jejich odolnost v tahu a ohybu v místě poškození.

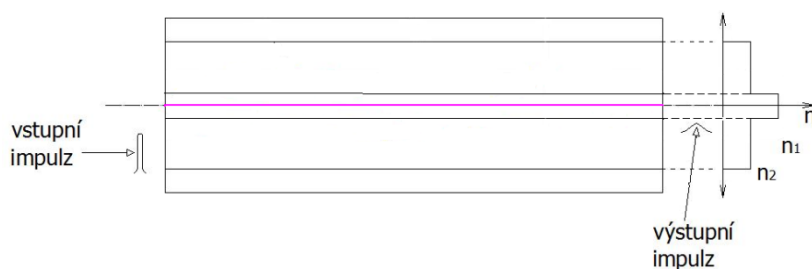
### 1.2.1 Druhy optických vláken

Optická vlákna se dělí podle dvou základních parametrů, a to:

- podle způsobu vedení signálu vláknem,
- dle jeho schopnosti propouštět vedený signál skrz plášť optického vlákna.

#### *Optická vlákna dělená podle způsobu vedení signálu*

a) **Jednovidová optická vlákna** - v tomto typu vlákna se vede pouze jeden paprsek, a to podél osy vlákna. V těchto vláknech je paprsek veden rovnoběžně bez odrazů. Tento typ vlákna má velmi malý průměr jádra v poměru k průměru pláště, který je několikanásobně větší (obr. 5) Tato vlákna se používají převážně v telekomunikacích.[3]



Obr. 5 Jednovidové optické vlákno [3]

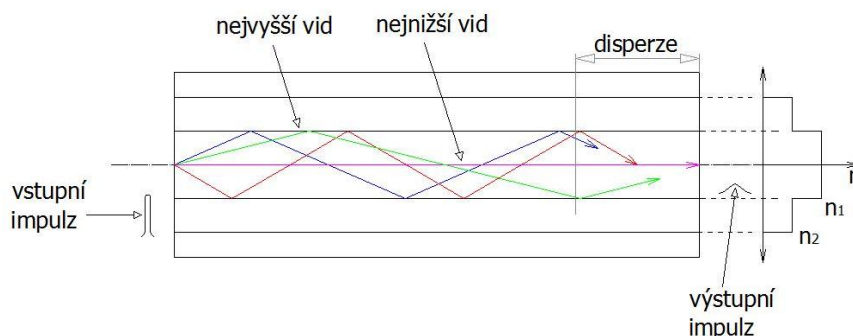
b) **Mnohavidová optická vlákna** - vláknem je přenášeno několik vidů (paprsků) najednou. Paprsky se vláknem šíří odrazem od vnitřní stěny pláště, kde se část paprsků odrazí a část prostoupí skrz plášť. Pokud vlákno není opatřeno obalem, vedený světelný signál způsobí, že optické vlákno na povrchu svítí. [3]. Tato vlákna jsou na výrobu nejméně náročná. Vyrábí se z materiálů na bázi skla ( $\text{SiO}_2$ ) nebo z průhledných polymerů (PMMA). Mnohavidová vlákna jsou vhodná na kratší vzdálenosti, protože tato vlákna mají tzv. módovou disperzi.[7].

Odraz ve vlákně může být:

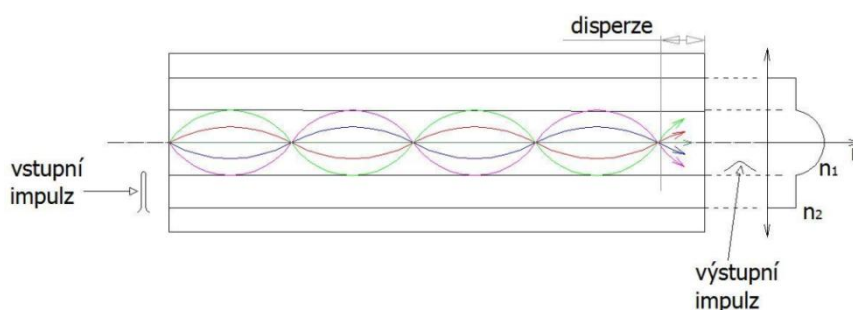
- se skokovou změnou indexu lomu,
- s gradientní (postupnou) změnou indexu lomu.

Rozdílem mezi těmito dvěma druhy odrazu je, že při skokové změně je využíván princip totálního odrazu, který je narušen dvěma složkami tvořící vlákno. U vláken s gradientní změnou dochází k plynulé změně drah paprsků, čímž vytváří spirálu (podobnou

sinusovému průběhu) opisující vnitřek vlákna. Tyto indexové změny jsou patrné na obr. 6 a 7. [3]



Obr. 6 Optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu [3]



Obr. 7 Optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu [3]

Další rozdíl mezi optickými vlákny se skokovým a gradientním vedením je ve výrobní technologii, kde výroba gradientních optických vláken je složitější, a proto i dražší.

Dále vlákna můžeme rozdělit podle materiálu, ze kterého byla vyrobena, a to na vlákna skleněná nebo vlákna plastová (PMMA). Skleněná vlákna jsou vyrobena z  $\text{SiO}_2$ , ale pro větší vlnové délky jsou používány např. chalkogenní skla. Tato skla mají index lomu přibližně 1,5. U plastových stranově vyzařujících optických vláken je jádro z PMMA, ten má index lomu 1,48 a obal z polykarbonátu, ten má index lomu 1,46.[7]

Rozdíl mezi koncově svítícími optickými vlákny a stranově vyzařujícími je ten, že u stranově vyzařujících vláken je rozdíl mezi indexy lomu v řádu setin (kolem 1 %). Čím víc se tento rozdíl zvyšuje, tím víc zůstávají vedené paprsky uvnitř vlákna. [7]



### 1.3 Měření parametrů optických vláken

Mezi základní parametry charakterizující funkci optického vlákna jsou:

- útlum vyslaného signálu
- šířka pásma

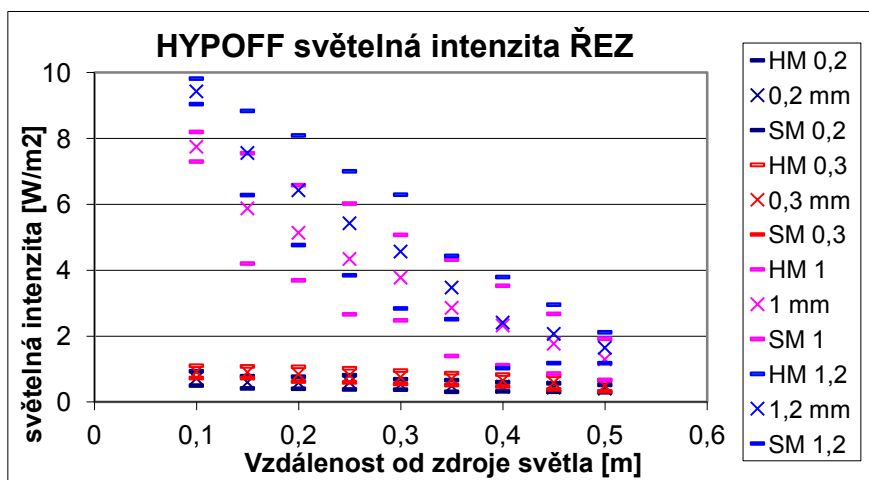
#### 1.3.1 Metody měření světelného útlumu

K zjištění útlumu vyslaného signálu se používají tři základní metody.

##### 1.3.1.1 Metoda dvou délek

Jedná se o měření dvoukrokové. V prvním kroku se změří výkon signálu  $P_0$  na konci vlákna o dané délce. Pak je vlákno zkráceno na požadovanou délku a na konci požadované délky, resp. vzdálenosti  $z$  od zdroje, je změřen výkon  $P_z$ . Pro výpočet signálu lze použít výše uvedenou rovnici (4). Metoda dvou délek je nejpřesnější metodou měření útlumu (lze dosáhnout až setinové přesnosti). [9]

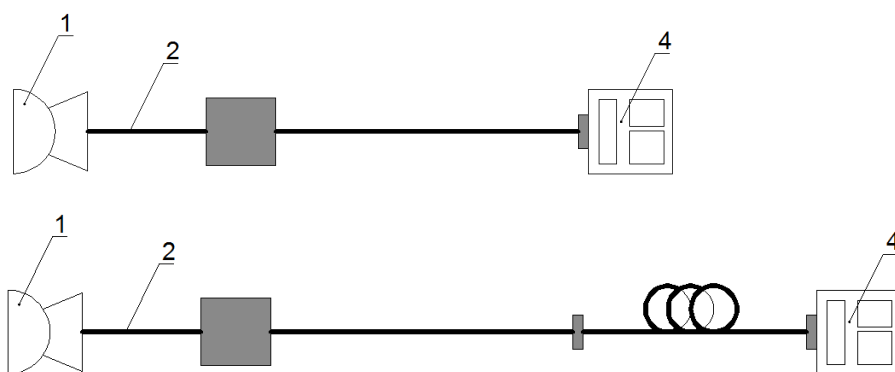
Tuto metodu měření jsem použila ve své bakalářské práci. Nevýhodou této metody je to, že je destrukční a časově náročná. Z těchto důvodů je využití této metody omezeno na vědecká pracoviště a na laboratoře výrobců. Výsledky měření jsou uvedeny v grafu 1. V grafu je uvedena světelná intenzita naměřená v řezu optického vlákna. Jsou zde porovnávány průměry 0,2; 0,3; 1 a 1,2 mm. Z grafu vyplývá, že čím má vlákno větší průměr, tím je schopno přenášet větší množství světelného signálu. Metoda měření a další zhodnocení je uvedena v bakalářské práci. [10]



Graf 1 - Měření světelné intenzity metodou dvou délek [10]

### 1.3.1.2 Metoda vložených ztrát

Metoda vložených ztrát může být dvoustupňová nebo čtyřstupňová. Výhodou této metody je to, že je nedestruktivní. Ale oproti metodě měření dvou délek je značně nepřesná. Tato metoda umožňuje určovat změny celkového útlumu vzhledem k vnějším vlivům. Nepřesnosti jsou způsobeny především v čistotě a úpravě čel a nastavení konců optického vlákna ke zdroji signálu a přijímači. Tato nepřesnost se dá částečně odstranit tak, že se měření provede na obou koncích a naměřené hodnoty se zprůměrují - dvoustupňová metoda. Tento proces je znázorněn na obr. 8. [11]. Pro čtyřstupňovou metodu je zapotřebí dvou optických přijímačů a dvou optických vysílačů.



Obr. 8 Metoda vložených ztrát [9]

1 - zdroj světla, 2 - krátká optická vlákna, 3 - optický přijímač, 4 - měřené optické vlákno

Dvě měření se provádějí při přímém spojení optického vysílače a přijímače obou souprav pomocí krátkých optických vláken ( $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ) a další dvě měření ( $P_{21}$ ,  $P_{22}$ ) se provádějí při zapojení zkoumaného optického vlákna. Vyhodnocení naměřených hodnot, je provedeno dle rovnice (6). [11]

$$\dot{U}_v = 10 \cdot \log \sqrt{\frac{P_{12} \cdot P_{21}}{P_{11} \cdot P_{22}}} \text{ [dB]} \quad (6)$$

### 1.3.1.3 Metoda měření zpětného rozptylu

V dnešní době se považuje tato metoda za nejvýznamnější metodu měření útlumu světelného impulsu. V této metodě se vyhodnocuje časová závislost zpětně rozptýleného optického výkonu při šíření úzkého optického impulsu ve vlákně. Metoda se používá při montáži nebo přímo v provozu optických vláken a kabelů. Tato metoda vychází z podstaty

Rayleighho rozptylu, který využívá vztah pro intenzitu světla rozptýleného jednou částicí (molekulou). Ten je charakterizován následující rovnicí (7). [9]

$$i_{\theta} = I_0 \cdot \frac{\pi^2 \cdot \alpha^2}{\varepsilon_0^2 \cdot \lambda^4} \cdot \frac{F(\theta)}{l^2} \quad [W/m^2] \quad (7)$$

kde  $I_0$  je celková intenzita dopadajícího (primárního) záření,  $\alpha$  polarizovatelnost částice,  $\varepsilon_0$  permitivita vakua,  $\lambda$  vlnová délka primárního i rozptýleného světla v daném disperzním prostředí,  $F(\theta)$  je funkce úhlu pozorování, jejíž tvar závisí na charakteru primárního paprsku,  $l$  vzdálenost detektoru měřícího intenzitu od zdroje rozptýleného světla. [12]

### **1.3.2 Metoda zjišťování šířky pásma**

U optických vláken, kde je přenášený signál světlo, je šířka pásma standardně vymezena rozsahem vlnových délek 390 – 790 nm, které jsou běžně nazývány bílým světlem. Šířku pásma konkrétního světlovodného vlákna, je možné zjistit spektroskopickými měřícími metodami tj. v konfiguraci- světlo ze zdroje se známou šířkou pásma je navedeno do vlákna a světlo na výstupu z vlákna je analyzováno spektrometrem a obě spektra jsou následně porovnána.

## **1.4 Faktory ovlivňující ztráty v optických vláknech**

Nejčastější faktory, které zapříčiní optické ztráty vyslaného signálu v optických vláknech, vznikají již při výrobě nebo při jejich užívání. Útlum je nejvíce ovlivněn třemi faktory:

- materiálovou absorpcí,
- materiálovým rozptylem,
- ztrátami v ohybu.

### 1.4.1 Materiálová absorpce

Představuje mechanismus ztrát, který souvisí s materiálem vláken, ale i se samotným procesem výroby vláken. Materiálová absorpce je způsobena transformací přenášeného signálu na teplo, a to vede ke snížení světelného výkonu.[6]

Existují dva druhy absorpcí:

- **vlastní** – je způsobena interakcí procházejícího světla se základními stavebními atomy optického vlákna např. PMMA

- **nevlastní** – ta je způsobena interakcí procházejícího světla s případnými nečistotami ve vlákne. Tyto nečistoty se do vlákna dostaly buď neúmyslně ve formě vodních par (ionty OH - největší podíl na absorpci), prachu či drobných částic, které se uvolňují při výrobě, nebo cíleně jako mikrokrystalky, které se do vlákna přidávají, aby se zvýšila svítivost vláken. [6]. Příměsi OH iontů, zejména do skleněných optických vláken, způsobují mikrotrhliny, kvůli kterým se vlákno stává náchylnější k praskání. [13]

### 1.4.2 Materiálový rozptyl

Je způsoben nepravidelnostmi vznikajícími především při chladnutí po vydloužení optických vláken. Náhodným rozložením molekul vzniká náhodné rozložení hodnot indexu lomu (prostorová fluktuace). Po dopadu na nehomogenitu dochází k všesměrovému rozptylu. Při tomto jevu dochází k tříštění paprsku do všech stran, čímž je část výkonu ztracena. Podíl rozptylu na celkovém útlumu je různý podle druhu použitého materiálu a použité technologie. [15]

#### 1.4.2.1 Lineární rozptyl

Je to lineární přechod částic vyslaného signálu obsaženého v jednom vidu do vidu nového. Lineární rozptyl je definován podle Rayleighna a podle Mie. [15].

*Rayleighův rozptyl* – Je to dominující jev v optické komunikaci. Tento jev vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky. Je důsledkem malých náhodných nehomogenit atomové struktury vlákna vztažených k vlnové délce procházejícího světla. Tento jev se nedá odstranit dokonce ani podchlazením vlákna na absolutní nulu, protože při absolutní nule dojde k „zamrznutí“

jednotlivých pozic atomů v krystalické mřížce. Světlo se pak kolem těchto „zamrzlých“ útvarů ohýbá a vznikají ztráty rozptylem. [15].

*Mie rozptyl* – Vzniká na nehomogenitách srovnatelných s vlnovou délkou. Je způsoben nedokonalostí válcové struktury optického vlákna, kolísáním průměru jádra, napětím ve vlákně, mikroskopickými bublinami a dalšími aspekty srovnatelnými s vlnovou délkou. Rozptyl se významně zvyšuje pokud se geometrické nepravidelnosti překročí o 1/10 vlnové délky. Mieho ztráty lze částečně eliminovat: zdokonalením výrobního procesu vlákna, odstraněním nerovnoměrností při výrobě a pečlivým tažením vlákna a nanášením dalších vrstev. [15]

#### 1.4.2.2 Nelineární rozptyl

Rozptyl je interakce procházejícího světla s molekulami materiálu vlákna.

*Ramanův rozptyl* – je způsoben interakcemi světelné vlny s kmity molekul světlovodného materiálu. Rozptýlená světelná vlna se šíří oběma směry. Frekvenční posuv v dopředném i zpětném směru. [15].

*Brillouinův rozptyl* – je způsoben interakcemi akustických vln ve světlovodu a světelné vlny o nadkritickém výkonu. Frekvenční posuv je ve zpětném směru. [15]

*Stimulovaný rozptyl* – jedná se o jev, při kterém dochází k rozptylu světelné vlny srážkami s tepelně kmitajícími atomy. Frekvenční posuv je v dopředném směru. [15]

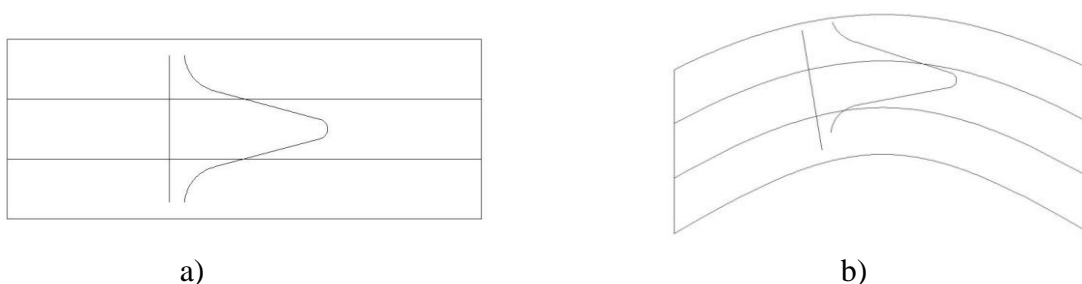
*Čtvrtvlnné směšování* – jedná se o jev, při němž interakcí dvou a více signálů vlnových délek vznikají signály o nových vlnových délkách. Tento jev je buzen silnými optickými signály. [15]

#### 1.4.3 Ztráty ohybem

Velká část energie se šíří i pláštěm vlákna, proto není problém tuto energii ohybem vyvést. Při ohýbání optického vlákna dochází k deformaci pole vedených vidů, které se šíří vláknem. Ohyb je geometrický efekt, který snadno vznikne při běžné manipulaci. Ten nejen, že způsobí ztrátu vyslaného signálu, ale má i za následek, že v těchto místech je vlákno nejnáchylnější k mechanickému poškození. Tyto ohyby rozdělujeme na mikro a makro ohyby. [16]

### 1.4.3.1 Makroohyb

Je způsoben vlastním ohybem vlákna. K útlumu signálu dochází tak, že část vidu (paprsku), která se nachází na vnější straně ohybu vlákna, je vyvázána (vyzařena) z vlákna – viz obr. 9. Aby se vid (papрек) nevyvázal, tak by se musel šířit větší rychlostí, než je rychlost světla v daném prostředí, což je v praxi nemožné. Pak by byla splněna podmínka kolmosti vlnoplochy ke směru šíření a vid (papрек) by zůstal uvnitř vlákna. [16]



Obr. 9 a) vid v napřímeném vlákně, b) vid při ohybu vlákna [15]

Kritický poloměr ohybu pro mnohavidová optická vlákna je vyjádřen v rovnici (8). Kritický poloměr ohybu je takový poloměr, při kterém se začnou projevovat ztráty výkonu. Rovnice (8) je odvozena ze základů geometrické optiky. Tato rovnice vychází z předpokladu, že dojde k porušení úplného odrazu na rozhraní jádra a pláště. [16]

$$R_K = \frac{3 \cdot n_1^2 \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{3}{2}}} [\mu m] \quad (8)$$

kde  $n_1$ ,  $n_2$  jsou indexy lomu jádra a pláště v daném prostředí a  $\lambda$  je vlnová délka vyslaného signálu.

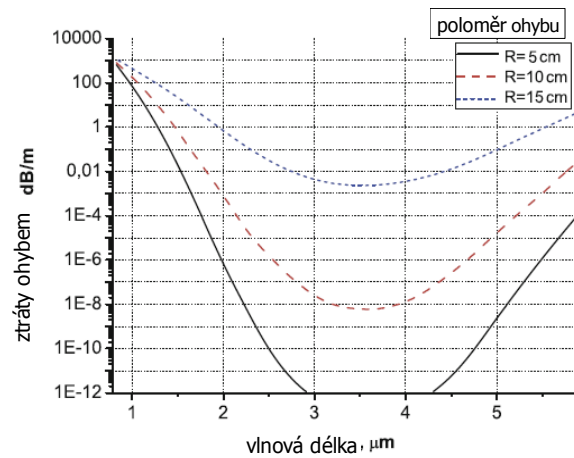
Podobnou rovnicí je odvozený matematický model (9), který umožňuje vyjádřit podélné a transversální složky pole. Výsledky těchto kritických poloměrů jsou o jeden řád vyšší než u předchozí rovnice. Tato rovnice zahrnuje navíc normovaný kmitočet  $V$ , vlnové číslo  $K_o$ , typ zkoumaného vidu  $u$  a měrný útlum  $\alpha$ . [16]

$$R_K = \frac{2 \cdot K_o^2 \cdot \alpha^2 \cdot n_1^2}{V^2 - u^2} [\mu m] \quad (9)$$

Kritický poloměr ohybu se určuje i u jednovidových optických vláken. Tento poloměr je dán rovnicí (10), kde je  $\lambda_c$  mezní vlnová délka pro vedení ve vlákne. [17]

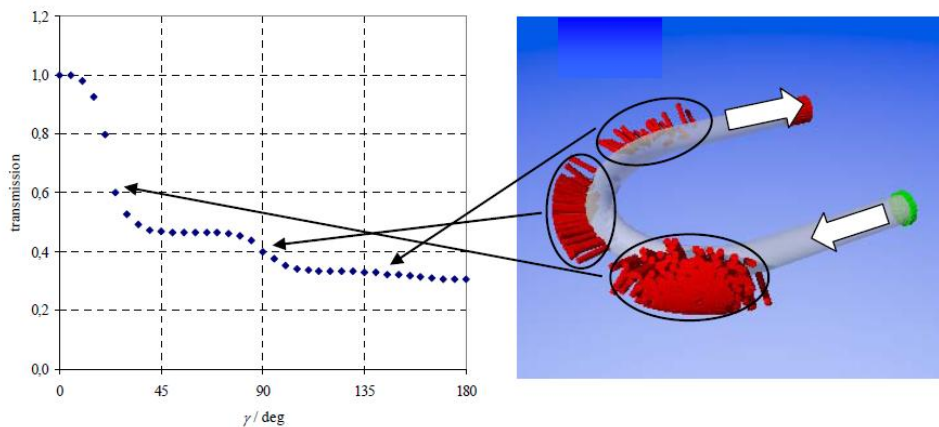
$$R = \frac{20\lambda}{(n_1 - n_2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left( 2,748 - 0,996 \cdot \frac{\lambda}{\lambda_c} \right) [\mu m] \quad (10)$$

Na obr. 10 jsou ukázány ztráty ohybem pro mikrostrukturní optická vlákna, kde je patrné minimum ztrát při specifické vlnové délce, jehož poloha nezávisí na poloměru ohybu. [18]



Obr. 10 Ztráty ohybem pro mikrostrukturní optická vlákna [18]

Na obr. 11 je ukázán výsledek simulačního experimentu pro stranově vyzařující optická vlákna mající poloměr  $r = 0,5$  mm a poloměr ohybu  $Rb = 4$  mm. Je zvolen kritický úhel  $N_c = 70^\circ$ . Křivka přenosu světla jako funkce úhlu ohybu optického vlákna  $\gamma$  je korelována se zobrazením světelných paprsků vyzařujících z ohnutého vlákna. [5]



Obr. 11 Přenos světla v závislosti na úhlu ohybu, poloměr ohybu 4 mm [5]

Každý červený válec na obr. 11 zastupuje intenzitu vystupujícího signálu z vlákna. Nejvýraznější ztráty jsou v oblasti  $\gamma = 22,5^\circ$ , kde přechází napříměný úsek vlákna na ohyb. Tyto ztráty mohou být až 55 %. Velikost ztrát ve dvou dalších zónách je kolem 12 % a 3 %. [5]

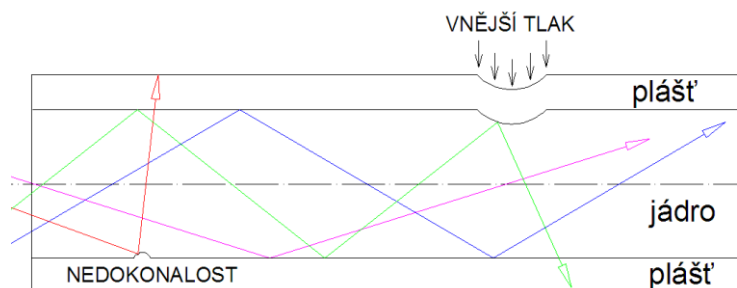
Útlumu (11) přenášeného signálu lze určit z rovnice:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \cdot \frac{A_e^2}{P} \cdot \frac{r^{\frac{-4d \cdot W^3 \cdot R_b}{3 \cdot r \cdot V^2}}}{W \sqrt{\frac{W \cdot R_b}{r + V^2}}} \quad [dB] \quad (11)$$

Zde  $A_e$  je amplituda světelného pole v plášti,  $P$  výkon přenášený hlavním módem,  $r$  je poloměr jádra,  $d$  je relativní rozdíl mezi indexy lomu jádra a pláště,  $R_b$  poloměr ohybu,  $V$  je normalizovaná frekvence,  $W$  je normalizovaný parametr úbytku výkonu pro plášť. [5]

#### 1.4.3.2 Mikroohyb

Tyto ztráty jsou způsobeny kvůli drobným nedokonalostem povrchu vlákna. Jedná se o drobné poruchy přímocárosti osy optického vlákna a vzhledem k tomu, že se vyskytují zcela náhodně a po celé optické trase, mohou v konečném důsledku způsobit značný útlum. Mikroohyb vzniká i při výrobě, kdy dochází k nesteromnému odtahu a tak vzniká jistá variabilita v průměru těchto vláken. Na obr. 12 je ukázáno, jak se světelné paprsky po střetnutí s mikroohybem vyváží ven z vlákna. [15]

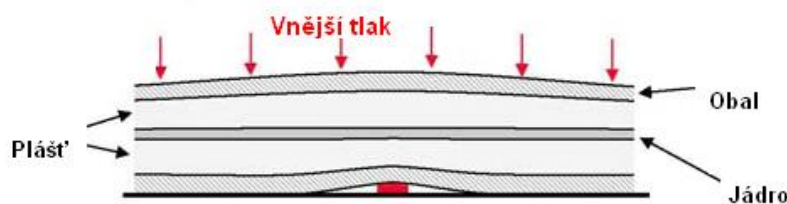


Obr. 12 Mikroohyb způsobený při výrobě [3].

Mikroohyb může vzniknout i při užívání, kdy na vlákno působí tlak z okolí (obr. 13). Tím dojde k prohnutí vlákna, které způsobí vyvážení přenášeného signálu. Výskyt

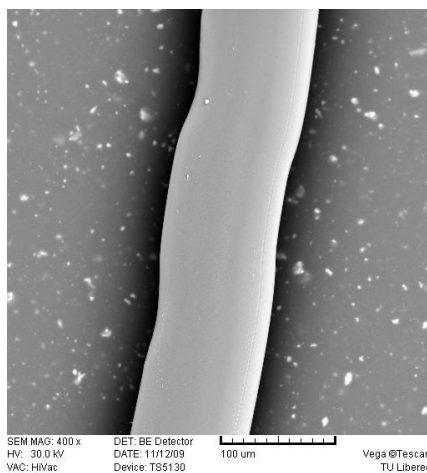


mikroohybu a jeho podíl na celkovém útlumu se velmi těžko určuje, ale je možné jej stanovit experimentálně pomocí statistických metod. [15]



Obr. 13 Mikroohyb vlákna [12]

Na obr. 14 je praktická ukázka mikroohybu, který vznikl po zatčení optického vlákna do tkaniny. Mikroohyb vznikl působením tlaku útkových nití.



Obr. 14 Mikroohyb způsobený implementací do tkaniny

## **1.5 Úpravy povrchu optických vláken**

S řešením této problematiky se setkáváme velmi zřídka. To z toho důvodu, že optická vlákna se používají spíše v telekomunikacích, kde je podstatné, aby vyslaný signál zůstal uvnitř optického vlákna a jeho ztráty byly co nejmenší.

Úpravy povrchu optických vláken se provádějí za účelem zlepšení jejich vlastností, především jejich schopnosti vyzařování přenášeného světelného signálu. Povrch optických vláken se může upravovat mechanicky, chemicky nebo termicky. Tyto úpravy mají negativní vliv na jiné vlastnosti jako jsou pevnost v tahu, pevnost v ohybu atd. Výhodou je, že umožní koncově svítícím optickým vláknům svítit nejen v řezu, ale i v místě poškození, tedy na jejich povrchu.

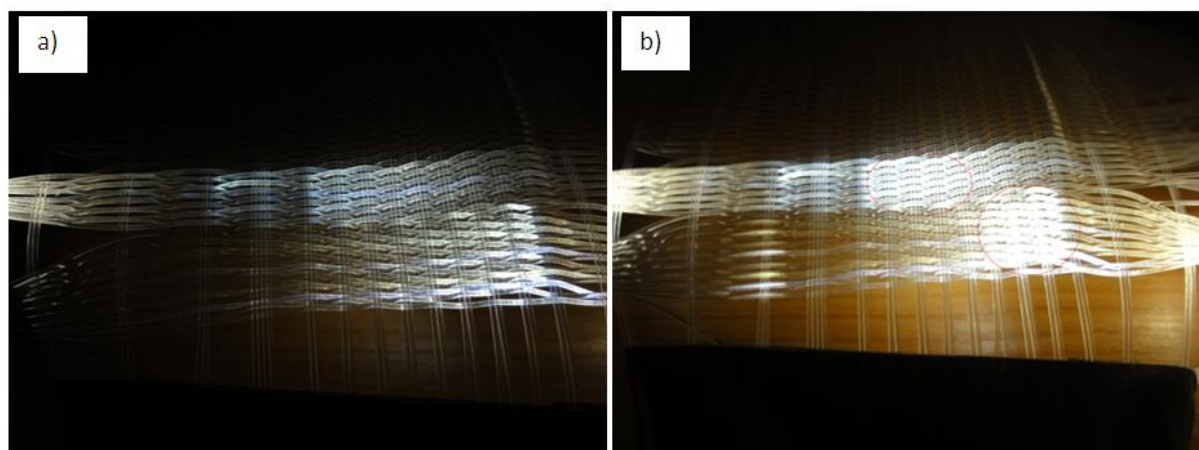
### 1.5.1 Mechanická úprava povrchu

Mechanickou úpravu optického vlákna lze provádět buď při výrobě, nebo před zakomponováním do textilního výrobku. Povrch optického vlákna se může narušit například sérií drsných kartáčů. Kartáče rotují a optické vlákno je rovnoměrně vedeno mezi nimi. Další možností jak mechanicky upravovat povrch optických vláken je pomocí brusných papírů. Optické vlákno je poškozováno brusným papírem buď tak, že je po papíře váleno, nebo je sevřeno mezi dva brusné papíry a taženo.

Podle míry poškozování lze ovlivnit intenzitu vyzařování. Toho se dá využít pro vzorování tak, že by se na každém úseku optického vlákna použila jiná intenzita a tento efekt na tkanině může vytvářet různé obrazce.

Dále lze mechanické poškození využít k tomu, aby se zabránilo poklesu světelné intenzity. Toho se docílí tak, že čím je úsek vlákna vzdálenější od zdroje světla, tím je poškozování intenzivnější. Výhodou mechanického poškození je to, že poškození není příliš hluboké a tudíž nemá výrazný vliv na tahové a ohybové vlastnosti.

Byla vyrobena tkanina z optických vláken, ta byla vložena do osnovy i do útku. Tkanina byla broušena na dvou místech brusným papírem a nasvícena – viz obr. 15, kde poškozená místa jsou vyznačena červenými kružnicemi.



Obr. 15 Mechanická poškození povrchu vláken

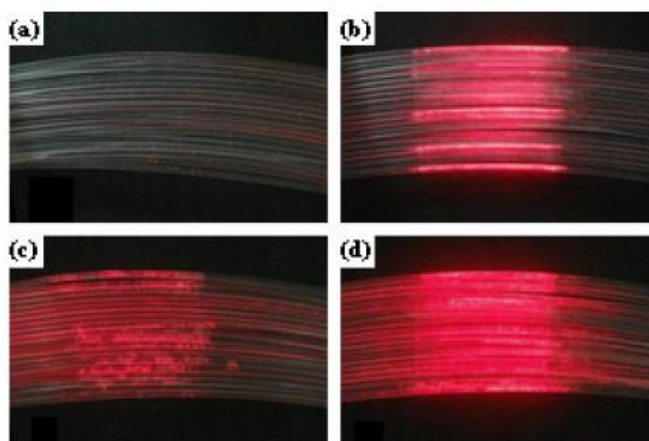
a) tkanina z optických vláken před odřením, b) tkanina z optických vláken po odřením

### 1.5.2 Chemická úprava povrchu

V této části jsou uvedeny prostředky pro poškozování PMMA optických vláken. Chemikálie na povrch optických vláken mohou být nanášeny pouhým potřením, nastříkáním nebo smáčením. Použitá metoda je volena podle druhu použité chemikálie a podle požadavku na konečnou intenzitu. Výsledná světelná intenzita je ovlivněna i délkou působení zvolené chemikálie.

#### 1.5.2.1 Chemikálie pro úpravu povrchu

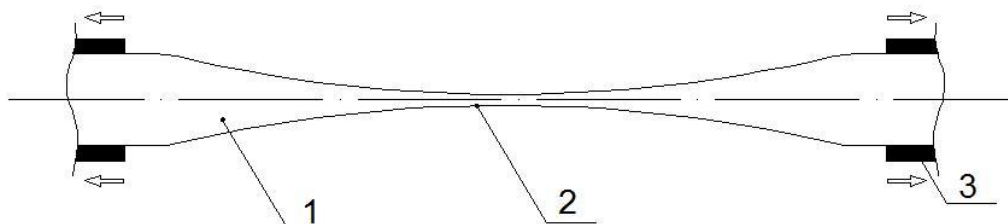
Pro úpravu leptáním se volí běžné chemikálie, které reagují s PMMA, jako jsou např.: anorganické kyseliny (aceton a methyl keton izobutyl), ethyl-acetát, atd. Na severokorejské univerzitě Chonam National byl proveden test nanášení ethyl-acetátu na povrch vlákna. Ten byl na povrch koncově svítících optických vláken aplikován za pomoci rozprašovače. Výsledky tohoto testu jsou na obr. 16. [20]



Obr. 16 Různá poškození vláken

a) koncově svítící optická vlákna bez poškození, b) poškození povrchu vláken brusným papírem, c) povrch vláken postříkán rozprašovačem s ethyl-acetátem (rozleptání), d) poškození povrchu vláken brusným papírem a následně postříkaná ethyl-acetátem [20].

K úpravě optických vláken můžeme použít i organická rozpouštědla. Ta způsobí, že v místě nanesení rozpouštědla a za mírného tažení (v řádu mikrometrů) se optické vlákno zúží (obr. 17). Zúžení lze docílit i tím, že optické vlákno v místě zúžení ohřejeme plamenem nebo laserem. Tato metoda se nedoporučuje vzhledem k tání celého vlákna a nejen jeho povrchu. [21]

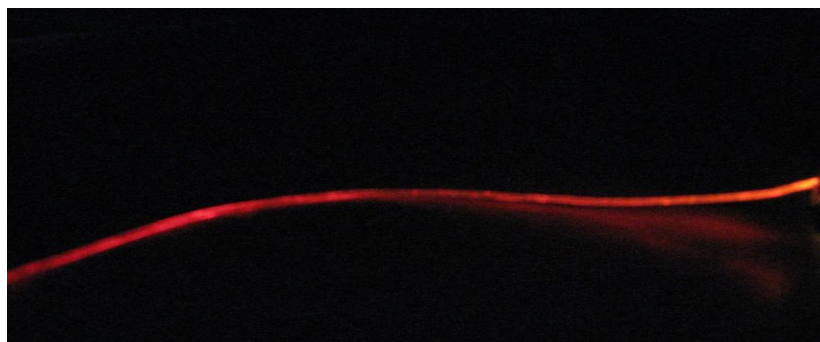


Obr. 17 Zužování optického vlákna [21]

1 – optické vlákno, 2 – zúžené místo, 3 – čelisti

#### 1.5.2.2 Barvení optických vláken

Další řízený vliv chemikálií je použití barviv. K tomuto účelu je možné použít např. disperzní barviva. Konečný výsledek obarvení lze ovlivnit buď poměrem barviva a vody v lázni, ale i dobou působení lázně na povrch optického vlákna. Ukázka takového zabarvení je na obr. 18. Zde je ukázáno obarvení optického vlákna Flexi červeným disperzním barvivem od firmy Huntsman. Vláknko bylo ponořeno do barvicí lázně v poměru 5 g/100 ml. V této lázni bylo ponecháno 20 minut při teplotě 100 °C. [22]



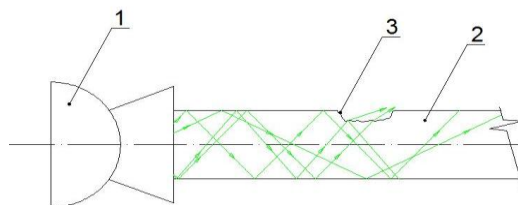
Obr. 18 Obarvené optické vlákno

Díky této možnosti úpravy povrchu není již zapotřebí použití barevných diod. To je výhodné při barevném vzorování v jednom výrobku, kde nemusí být složitým způsobem navedeno každé vlákno k jinak zabarvené diodě. Ve výrobku mohou být použita různě obarvená vlákna a jako zdroj světla bude použita jedna dioda s bílým světlem.

#### 1.5.3 Termická úprava povrchu

U termické úpravy se musí brát ohled na použitý materiál a na jeho teplotu tání. U PMMA je teplota tání 160 °C. Výhodou této úpravy je možnost jejího použití u hotových výrobků. Musí být však dodrženy určité podmínky. Nevýhodou je hluboké poškození

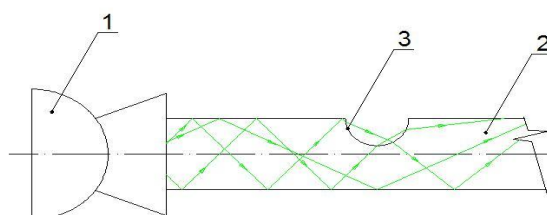
upravovaného místa, tudíž by na jednom vlákně nemělo být víc než jedno poškození. Pro vzor je lepší, je-li poškození nerovnoměrné a nepravidelné – viz obr. 19. Takto poškozená místa lépe svítí díky malé šířce pásma, které má vyslané světlo. Pokud je poškození vytvořeno jednou hlubokou rýhou, má to negativní vliv na jejich pevnost v tahu.



Obr. 19 Nerovnoměrné poškození optického vlákna

1 – zdroj světla, 2 – optické vlákno, 3 – členité poškození

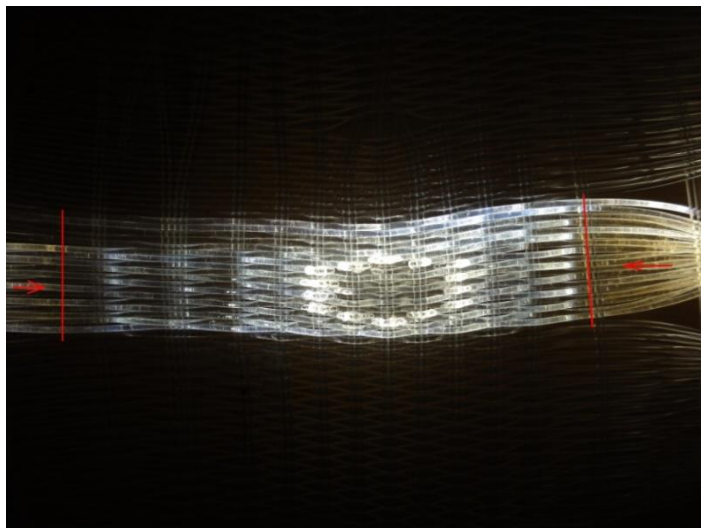
K termickým úpravám se může použít laser, profilované raznice vyhřívané různými médii. Pokud je optické vlákno poškozeno laserem, může dojít k tomu, že po roztavení optického vlákna vznikne natolik hladká plocha, aby se z jedné hrany paprsek vyvázal a na druhé straně do vlákna opět pronikl – viz obr. 20.



Obr. 20 poškození optického vlákna laserem

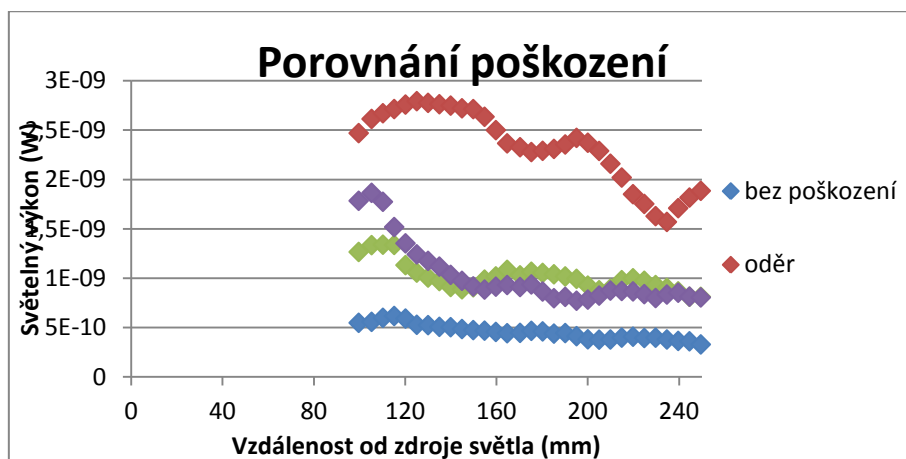
1 – zdroj světla, 2 – optické vlákno, 3 – hladké poškození

Ukázka termického poškození optických vláken ve tkanině je na obr. 21. Poškození bylo provedeno pistolovou pájkou za účelem vytvoření jednoduchého obrazce ve tvaru kruhu. Zde je v některých případech vlákno poškozeno na dvou místech, proto bylo zapotřebí nasvícení vzorku ze dvou stran.



Obr. 21 Termické poškození

Poškozováním povrchu optických vláken se zabývá Katedra textilních technologií na Technické univerzitě v Liberci pod vedením doc. Křemenákové. Na následujícím grafu (Graf 2), jsou uvedeny výsledky měření světelného výkonu před a po poškození optických vláken. Bylo měřeno, jaký vliv má poškození oděrem, UV zářením, a chemické poškození tetrachlorethylenem, na světelný výkon koncově svítících optických vláken. Podrobnější údaje jsou uvedeny ve zprávě pro rok 2011. [23]



Graf 2 - Vliv poškození povrchu optického vlákna

## 1.6 Základní textilní pojmy

V následujících kapitolách diplomové práce se zmiňujeme o aplikaci optických vláken do tkaniny. V této podkapitole jsou popsány základní pojmy a parametry popisující tkaniny.

### 1.6.1 Zvlnění nití ve tkanině

Zvlnění je základní parametr ovlivňující sklon nitě ve tkanině vzhledem k ose tkaniny. Mírou zvlnění nitě je výška vazné nitě. Pro vyjádření úhlu provázání se využívá Pierceův model.

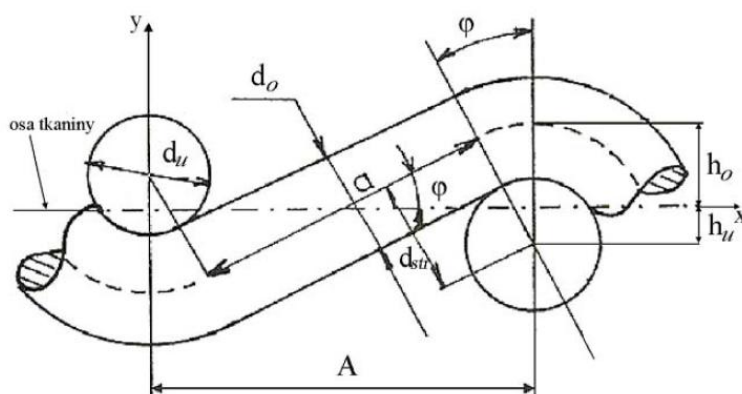
Pierceův model vychází z následujících předpokladů [24]:

- průměr nitě ve tkanině je kruhový (neuvažuje ani v jedné soustavě nití se zploštěním)
- vazná vlna osnovy respektive útku je nahrazena obloukem kružnice a přímkou
- vazná vlna je provázána v plátňové vazbě

Pierceův model pro plátňovou vazbu bývá obvykle popsán těmito parametry [24]:

- průměr jednotlivých nití v řezu  $d_o$ ,  $d_u$ ,  $d_{str}$
- velikost rozteče  $A$ ,
- výška zvlnění  $h_o$ ,  $h_u$
- úhel zvlnění  $\varphi$

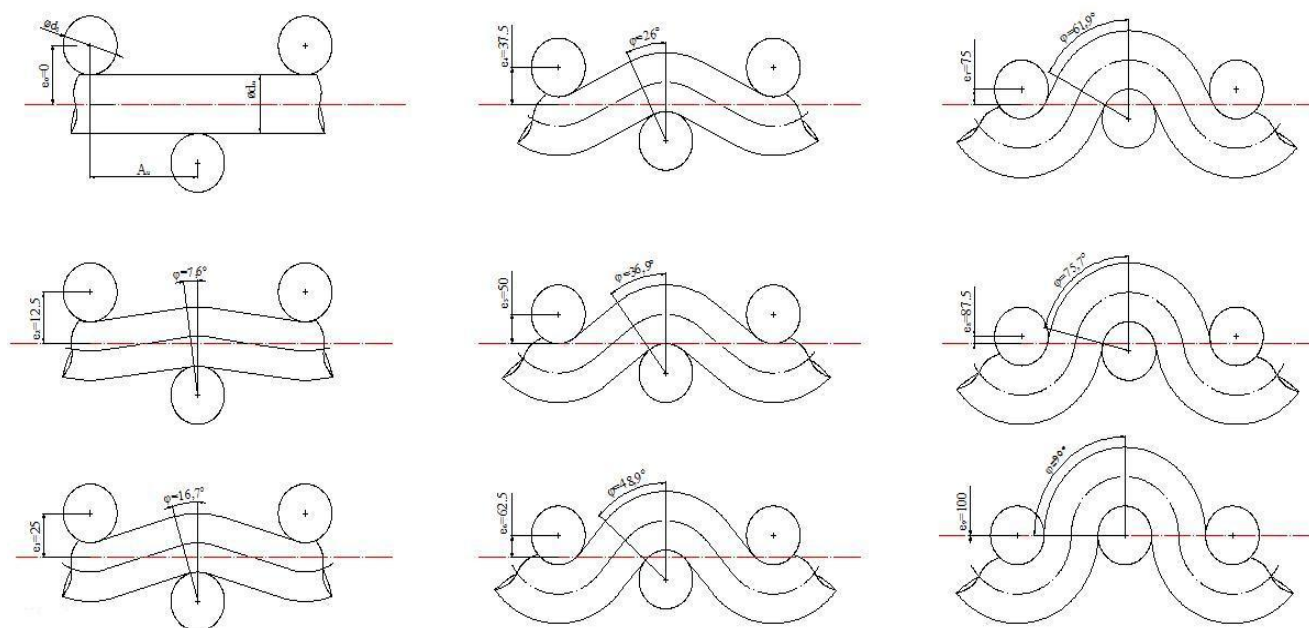
Pierceův model je uveden na obr. 22, kde jsou vyobrazeny jednotlivé parametry.



Obr. 22 Pierceův model provázání [24]

Míru zvlnění osnovní a útkové nitě lze stanovit z práce Novikova – viz obr. 23. Z Novikovy práce vyplývá devět fází zvlnění obou soustav nití ve tkanině, které jsou odstupňovány dle velikosti prohnutí nitě. [24]





Obr. 23 Devět fází provázání, odstupňovaných podle míry zvlnění osnovní a útkové nitě podle Novikova [24].

Míry zvlnění platí jak pro osnovní  $e_o$ , tak pro útkové  $e_u$  nitě. Níže jsou uvedeny hodnoty zvlnění pro jednotlivé fáze:

1. fáze  $e_o = 0$  (osnova je napříměna, útek je maximálně zvlněn)
2. fáze  $e_o = 0,125$       3. fáze  $e_o = 0,25$       4. fáze  $e_o = 0,375$
5. fáze  $e_o = 0,5$  (osnova i útek je zvlněn stejně)
6. fáze  $e_o = 0,625$       7. fáze  $e_o = 0,75$       8. fáze  $e_o = 0,875$
9. fáze  $e_o = 1$  (osnova je maximálně zvlněna, útek je napříměn) [21].

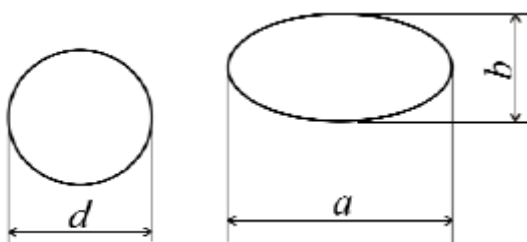
### 1.6.2 Vazný bod

Vazný bod je místo, kde se vzájemně kříží obě soustavy nití (osnova a útek). Rozlišujeme dva druhy vazných bodů: vazný bod osnovní a vazný bod útkový. Je-li osnovní nit nad útkovou nití, pak se jedná o osnovní bod. [24]



### 1.6.3 Deformace nití ve tkanině

Pokud modelujeme řez tkaninou, používáme k vytvoření modelu ideální kruh o průměru  $d$ . V praxi však tato situace téměř nikdy nenastane. Příze vetkaná do tkaniny je vystavena namáhání, kde je příze deformována tlaky kolmými k ose a tím dochází ke změně jejího profilu v příčném řezu. Viz obr 24 a),b). Takto vzniklý profil je charakterizován šířkou  $a$  a výškou  $b$ . Deformace převážně nastává v místě vazného bodu ve tkanině. [25]



Obr.24 a) ideální kruh b) deformace ve tvaru elipsy [25]

### 1.6.4 Dostava tkaniny

Dostava tkaniny vyjadřuje, kolik nití je na jednotku délky podle ČSN 1049-2 (800804) (mod ISO 7211 – 2:1984). Rozeznávají se dva druhy dostavy podle toho v jakém směru je měřena, na dostavu osnovy a dostavu útku. [24]

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

Pro provedení experimentální části bylo zapotřebí vyvinout zařízení, která by byla schopna měřit světelnou intenzitu napřímených optických vláken a světelnou intenzitu ohnutých optických vláken při jejich definovaném ohybu. Dále pak je zapotřebí provést odhady, jakých úhlů je optické vlákno schopno dosáhnout při implementaci do textilních struktur.

### **2.1 Zabudování optických vláken do textilních struktur**

Textilní struktura by měla optické vlákno chránit proti vlivům vnějšího prostředí. Mezi nejběžnějšími vlivy patří mechanické poškození v podobě oděru, poškrábání nebo zlomení. Pokud je optické vlákno chráněno textilní strukturou, nedochází k chemickému poškození samotných vláken, tudíž jsou schopna odolávat např. vyšším teplotám, než kdyby byla vystavena teplotě přímo. Textilní struktura přidaná k optickým vláknům nezabrání ohýbání optického vlákna, které také optické vlákno poškozuje.

Velikost mikroohybu a makroohybu je závislá na vlastnostech zkoumaného optického vlákna a jeho průměru a tuhosti.

Metodami zjišťování vlivu mikro a makro ohybu na přenášený signál se zabývají normy ČSN EN 60793-1-47 ed. 3 Optická vlákna – Měřicí metody a zkušební postupy – Makroohybové ztráty a ČSN EN 3745-504 Letectví a kosmonautika – Optická vlákna a kabely pro letecké použití – Zkušební metody – část 504: Zkouška mikroohybem. Obě tyto normy popisují metody měření optických ztrát koncově svítících optických vláken. Normy jsou majetkem katedry textilních technologií, fakulty textilní, technické univerzity v Liberci

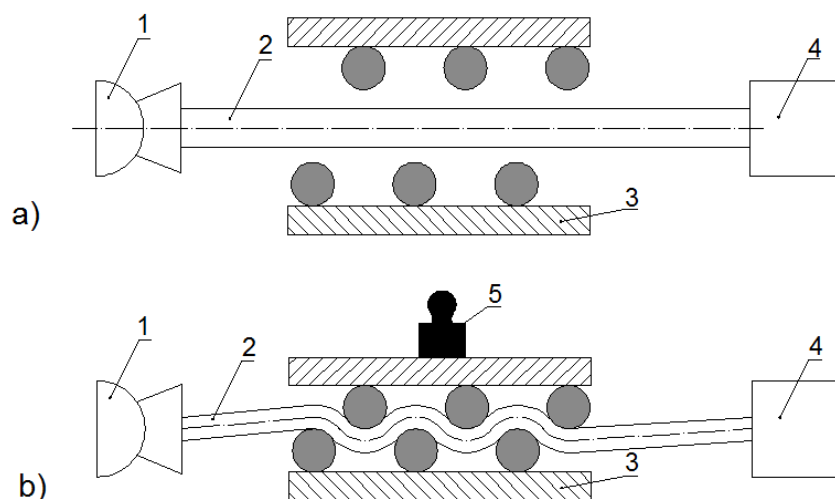
#### ***2.1.1 Mikroohyb***

Mikroohyb lze také definovat jako periodicky se opakující změna zakřivení osy vlákna s malou amplitudou ohybu. [26]

##### ***2.1.1.1 Testování mikroohybu***

Vlákno je připojeno ke zdroji signálu a ke snímači. Provede se měření, které zjistí hodnotu intenzity vyslaného signálu na konci optického vlákna. Poté, co je hodnota

zaznamenána dojde k zatížení mikroohybové destičky (obr. 25) a provede se druhé měření intenzity vyslaného signálu. Rozdíl mezi těmito hodnotami je úbytek vyslaného signálu vlivem mikroohybu. Další údaje o provedení zkoušky mikroohybem je uveden v normě ČSN EN 3745-504 Letectví a kosmonautika – Optická vlákna a kabely pro letecké použití – Zkušební metody – část 504: Zkouška mikroohybem.



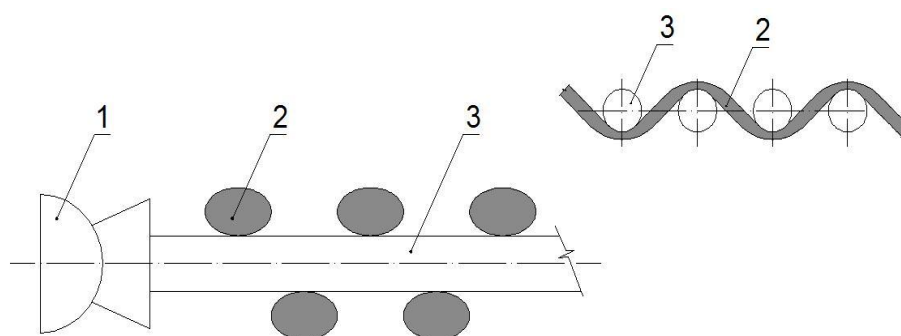
Obr. 25 Průběh zkoušky mikroohybu

a) měření výkonu před provedením zkoušky, b) měření poklesu výkonu vlivem mikroohybu

1 – zdroj signálu, 2 – optické vlákno, 3 – mikroohybové destičky, 4 – senzor, 5 – závaží

### 2.1.1.2 Vznik mikroohybu ve tkanině

Pokud je do tkaniny zakomponováno optické vlákno o vyšším průměru je ve tkanině velmi nepoddajné. Pokud se optické vlákno použije v kombinaci s běžným materiálem používaným v textilu (bavlna, PES...), optické vlákno se nezdeformuje a tyto nitě se deformují (obr. 26).

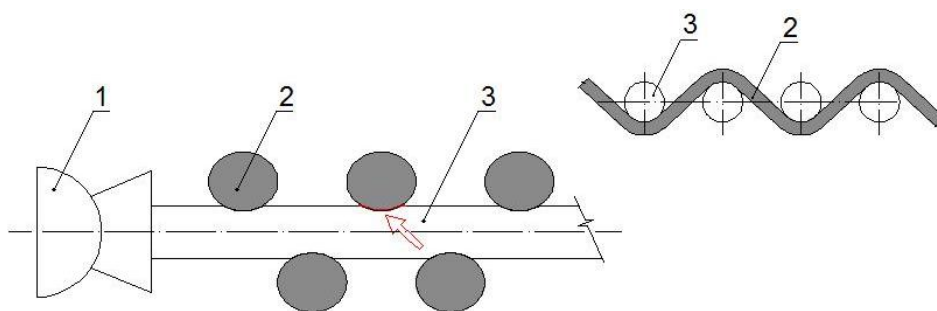


Obr. 26 Optické vlákno bez mikroohybu

1 – zdroj světla, 2 – deformovaná příze v útku, 3 – optické vlákno v osnově

Ke zvlnění optického vlákna dochází v případě, je-li použito ve druhé soustavě nití vlákno s podobnými mechanickými vlastnostmi např.: vlasce..., nebo záleží na použité konstrukci tkaniny např.: na zvolené dostavě.... Takto vzniklé tkaniny nebudou splývavé.

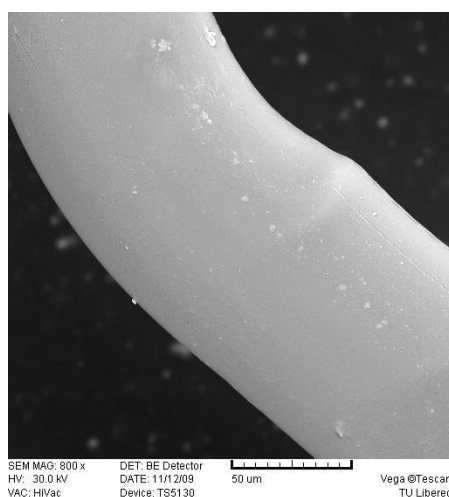
Může nastat i extrémní situace, a to taková, že nit, která kříží optické vlákno, se do něho vtlačí (obr. 27). Jedním ze způsobů, kterým situace vznikne je ten, pokud křížící nit je ze stejného nebo tvrdšího materiálu, nebo pokud bude použita vysoká dostava. Další způsob jak může dojít k vtlačení přídavné nitě do optického vlákna je ten, že se křížící nit do vlákna vtlačí vlivem tření nití o sebe.



Obr. 27 Optické vlákno s mikroohybem

1 – zdroj světla, 2 – vtlačený útek, 3 – optické vlákno v osnově

Na obr. 28 je faktická ukázka vzniklého mikroohybu. Toto vlákno bylo zatkáno v osnově a jako útek bylo použito také optické vlákno.



Obr. 28 Mikroohyb způsobený jinou soustavou nití

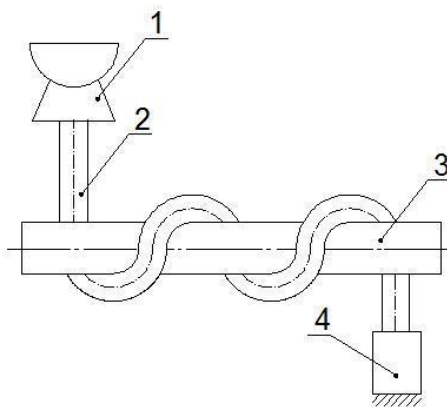
### 2.1.2 Makroohyb

Jak už bylo zmíněno v rešeršní části, makroohyb je způsoben vlastním ohybem vlákna.

#### 2.1.2.1 Testování makroohybu

Měření makroohybu je uvedené v normě ČSN EN 60793-1-47 ed. 3 Optická vlákna – Měřicí metody a zkušební postupy – Makroohybové ztráty. Tato norma uvádí dvě metody měření úbytku vyslaného signálu způsobený makroohybem.

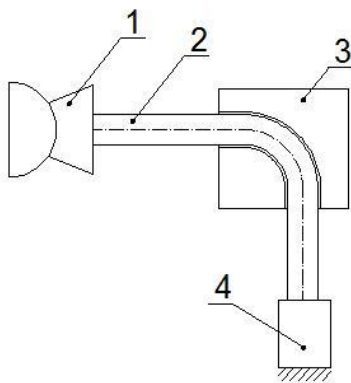
1. Metoda navíjecí – měření probíhá tak, že optické vlákno je navinuto na trn o daném průměru. Počet ovinů a průměr trnu se může libovolně měnit podle potřeb měření. Tato metoda je schematicky znázorněna na obr. 29.



Obr. 29 Navíjecí metoda

1 – zdroj světla, 2 – optické vlákno, 3 – trn, 4 – senzor

2. Metoda čtvrtkruhového ohybu – měření probíhá tak, že optické vlákno je navedeno do drážky v desce. Tyto drážky mohou mít různý rádius. Tato metoda je schematicky znázorněna na obr. 30.



Obr. 30 Čtvrtkruhová metoda

1 – zdroj světla, 2 – optické vlákno, 3 – destička s drážkou, 4 – senzor

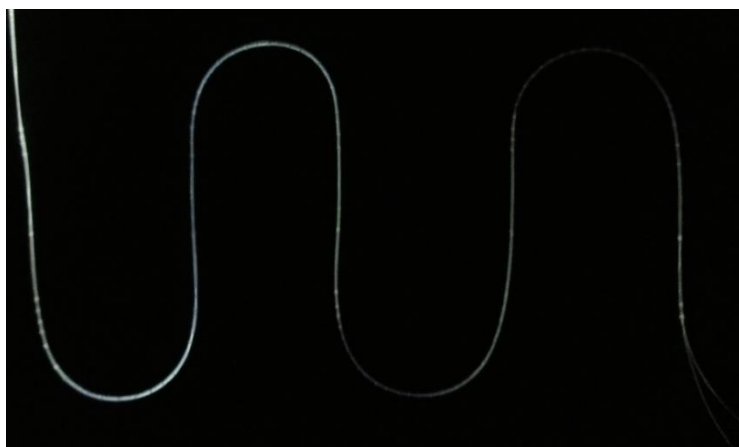
### 2.1.2.2 Vznik makroohybu v textilních strukturách

K makroohybům bude docházet téměř při každém využití optického vlákna v textilním výrobku. Optické vlákno lze do textilní struktury zakomponovat mnoha způsoby a téměř pokaždé na optickém vlákně vznikne makroohyb. Na obr. 31, je ukázka tašky, kde bylo optické vlákno opleteno a zakomponováno do lemu víka. U této tašky dochází k makroohybu na čtyřech místech.



Obr. 31 Reflexní taška od firmy Stap a.s.

Další možnost jak optická vlákna zakomponovat do textilní struktury je všíváním. Ukázka všívání je na obr. 32. Tato varianta umožňuje na textilní strukturu vytvářet různé motivy a obrazce. Pokud se použije tato metoda zakomponování, tak na optických vláknech vznikne rovněž několik makroohybů.



Obr. 32 Stranově vyzařující optická vlákna všitá na tkaninu

## **2.2 Návrhy metody měření světelné intenzity**

Stávající situace byla taková, že měření světelné intenzity na povrchu napřímených optických vláken se prováděla zdoluhavým ručním způsobem. Měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v ohybu je bez potřebných přípravků či vhodných zařízení prakticky nemožné.

Aby byla zařízení funkční, musela být navržena tak, aby dodržovala tyto požadavky:

- osa vlákna a osa senzoru musí být v jedné rovině,
- zařízení musí být schopno měřit různé průměry optických vláken,
- opakovatelnost měření.

### ***2.2.1 Měření světelné intenzity napřímených optických vláken***

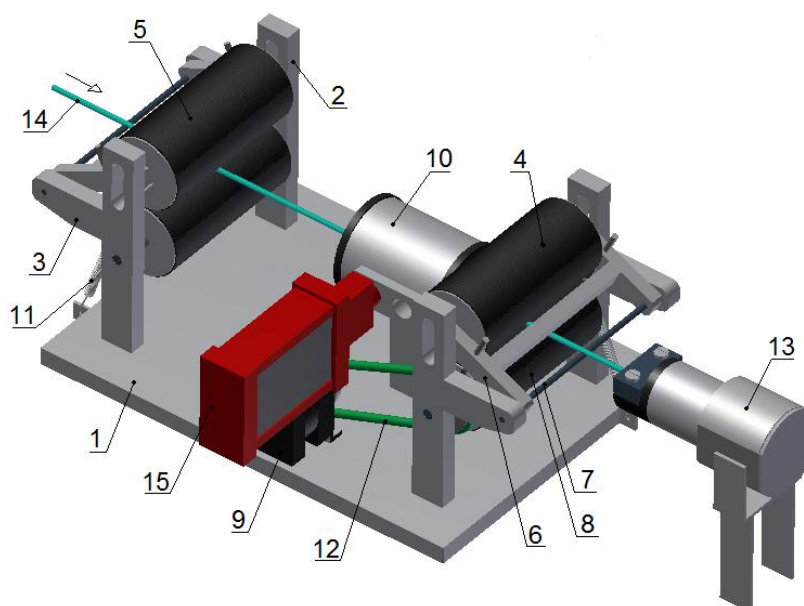
Současný způsob měření světelné intenzity napřímených optických vláken je popsán v mé bakalářské práci, kde se světelná intenzita na povrchu optických vláken měřila za pomoci Lab Master Ultima od firmy Coherent s fotodiodovým senzorem – viz obr. 33. Zařízení se obecně používá pro měření optického výkonu. Samotné měření probíhalo tak, že byla nejprve upravena osvětlovací plocha optického vlákna (úprava čela optických vláken je podrobně popsána v experimentální části). Upravená plocha se navedla ke zdroji světla a optické vlákno bylo napřímeno na desku z tmavého materiálu. Poté se na napřímené vlákno přikládal fotodiodický senzor v předem stanovených vzdálenostech, který zaznamenával hodnoty na display. Hodnoty se ručně zaznamenávaly do počítače a dále se zpracovávaly. Podrobnější popis je v bakalářské práci. [10]



Obr. 33 Lab Master Ultima [10]

### 2.2.1.1 Návrh zařízení pro měření světelné intenzity napřímených optických vláken

Navržené zařízení pro měření světelné intenzity je poloautomatické. Vláknem je přivedeno přes válečky pro vedení vlákna a odtahováno je válečky, které jsou umístěny za měřicím tunelem. Odtahovací válečky jsou poháněny krokovým motorem. Měření probíhá v temném tunelu, ke kterému je umístěn snímač. Krokový motor přes program spolupracuje se snímačem a po každém kroku dojde k naměření hodnoty světelné intenzity na daném místě odtahovaného vlákna. Návrh tohoto zařízení je na obr. 34.



Obr. 34 Zařízení pro měření světelné intenzity napřímených optických vláken

1 – základní deska, 2 – sloupky (4x), 3 – konzole, 4 – odtahové váleček, 5 – válečky k vedení vzorku, 6 – přítlačná páka válečku, 7 – uložení páky, 8 – hnací odtahový váleček, 9 – krokový motor, 10 – měřicí tunel, 11 – tažné pružiny, 12 – hnací řemen, 13 – osvětlovací zařízení, 14 – optické vlákno, 15 – snímač světelné intenzity

### 2.2.2 Měření světelné intenzity v místě ohybu optických vláken

Stávající situace je taková, že zařízení na měření světelné intenzity optických vláken v ohybu neexistuje. Proto je zapotřebí navrhnout a zkonstruovat vhodné zařízení.

#### 2.2.2.2 Vlastní návrh zařízení pro měření optických vláken v ohybu

Měření světelné intenzity ohýbaných vláken je složitější, protože optické vlákno musí být upevněno a v pohybu musí být snímač světelné intenzity. Při konstrukci zařízení se musí



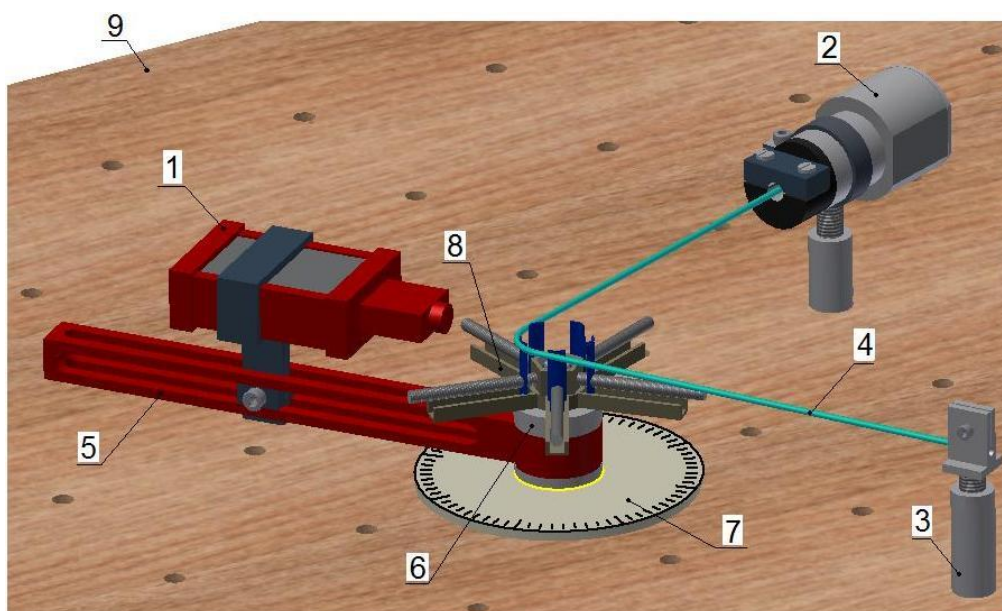
brát v úvahu také skutečnost, že měření probíhá na vnější straně oblouku. Dále pak je zapotřebí, aby bylo možné měnit velikost úhlu ohybu. Optická vlákna jsou i z různých materiálů, což má vliv na samotnou schopnost vlákna ohnout se. Z těchto důvodů bylo zapotřebí navrhnout několik alternativ, jak zařízení zkonstruovat.

#### Princip zařízení pro měření intenzity světla v ohybu vlákna č. 1

První možnou variantou je zařízení využívající pěti vhodně upravených obloukových segmentů, které vytváří požadovaný průměr pro ohyb vlákna. Vnější strana těchto segmentů je opatřena mělkou drážkou pro vedení vlákna. Vzdálenost obloukových segmentů od společného středu lze měnit pomocí šroubové vazby mezi obloukovým segmentem a závitovou tyčí, která otáčivý pohyb přemění v posuvný pohyb obloukového segmentu.

Zdroj světla a upevnění vlákna je umístěno na kolících, které lze libovolně umístit na vytvořené děrované desce, stejně tak jako středový sloup s otočným ramenem snímače světelné intenzity. Osa průměru ohybu vytvořeného pěti obloukovými segmenty a úhelník jsou v ose středového sloupu.

Světelná intenzita je měřena snímačem, jehož vzdálenost od vlákna lze nastavit na otočném rameni. Jednotlivá místa měření na ohnutém vlákne se nastavují ručně podle úhelníku. Toto zařízení je uvedeno na obr. 35.



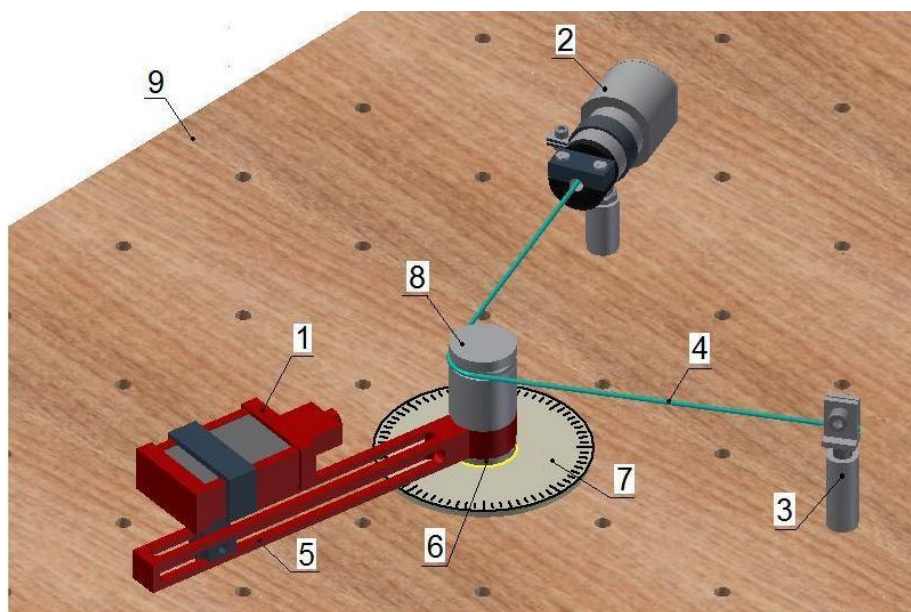
Obr. 35 Zařízení pro měření intenzity světla v ohybu vlákna č. 1

1 – snímač světelné intenzity, 2 – zdroj světla na kolíku, 3 – kolík k upevnění vlákna, 4 – vlákno, 5 – otočný držák snímače, 6 – středový sloup, 7 – úhelník, 8 – zařízení pro změnu průměru na principu čelistí, 9 – děrovaná pracovní deska

Předností tohoto zařízení je možnost vytvoření libovolného průměru pro ohyb optického vlákna pomocí nastavitelných segmentových obloků, které ale mohou při větších průměrech vytvářet nedokonalý ohyb optického vlákna. Děrovaná deska je omezující rozmístěním daných otvorů.

### Princip zařízení pro měření intenzity světla v ohybu vlákna č. 2

Další variantou je zařízení principiálně vycházející ze zařízení č. 1, které pro požadovaný průměr ohybu vlákna využívá různých válečků s různými průměry s mělkou drážkou pro vedení vlákna. Tyto válečky jsou nasazeny na středový sloup, na kterém je opět umístěné otočné rameno se snímačem světelné intenzity a úhelník k nastavení snímače k měření jednotlivých míst na ohnutém vlákně. Vzdálenost snímače od vlákna a poloha zdroje světla s upevněním vlákna lze opět upravit dle potřeb. Toto zařízení je na obr. 36.



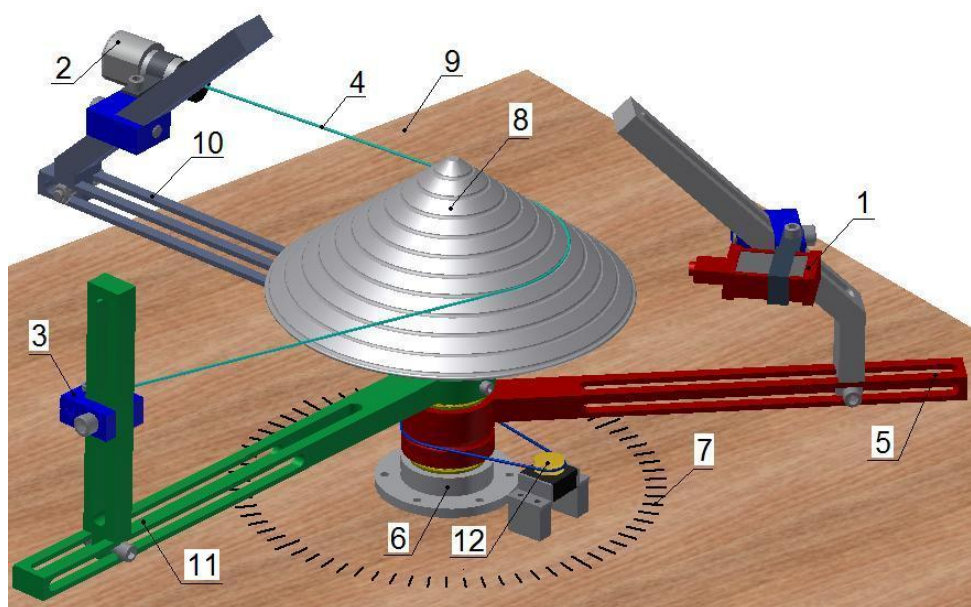
Obr. 36 Zařízení pro měření intenzity světla v ohybu vlákna č. 2

1 – snímač světelné intenzity, 2 – zdroj světla na kolíku, 3 – kolík k upevnění vlákna, 4 – vlákno, 5 – otočný držák snímače, 6 – středový sloup, 7 – úhelník, 8 – váleček pro vedení vlákna v ohybu (několik válečků s různými průměry), 9 – děrovaná pracovní deska

Základem tohoto zařízení je jednoduchost řešení různých průměrů ohybu optického vlákna. Rozmístění otvorů v děrované desce může být omezující pro vytváření požadovaných rádiusů ohybu optického vlákna, stejně tak jako u předchozí varianty.

Princip zařízení pro měření intenzity světla v ohybu vlákna č. 3

Tato varianta se od předchozích liší absencí děrované pracovní desky. Poloha zdroje světla a upevnění vlákna je zde řešena pomocí otočných ramen stejně jako snímač světelné intenzity. Tato ramena umožňují změnu vzdálenosti od středového sloupu a změnu výšky od pracovního stolu. Ohyb vlákna je zde vytvořen pomocí kužele, který v daném rozsahu nabízí různé průměry ohybu. Na povrchu kužele jsou pak vytvořeny mělké drážky k vedení vlákna. Tato varianta je rozšířena o pohon otočného ramene snímače, jehož krokový motor bude zajišťovat vhodné rozdělení jednotlivých měřených míst na ohnutém vlákně. Toto zařízení je na obr. 37.



Obr. 37 Zařízení pro měření intenzity světla v ohybu vlákna č. 3

1 – snímač světelné intenzity, 2 – zdroj světla, 3 – zajišťovací upínka, 4 – vlákno, 5 – otočný držák s posuvným sloupem pro snímače, 6 – středový sloup, 7 – úhelník, 8 – kužel s odstupňovanými drážkami pro vedení optického vlákna, 9 – pracovní deska, 10 – otočný držák s posuvným sloupem pro zdroj světla, 11 – otočný držák s otočným sloupem pro upnutí vlákna, 12 – krokový motor

Princip tohoto zařízení je odstranění děrované desky a zjednodušení polohování zdroje světla a upínky pro optické vlákno. Nevýhodou je nutnost kotoučů s různými průměry, které jsou kuželovitě umístěny. Toto zařízení je konstrukčně složitější vzhledem k použitým otočným ramenům.

### **Výběr vhodné alternativy**

Pro volbu správné varianty je zapotřebí vybrat vhodnou statistickou metodu výběru. Pro tyto účely bylo rozhodnuto, že vhodná varianta bude určena za pomoci rozhodovací analýzy (tab. 1).

Pro analýzu jsou zvolena následující kritéria:

- přesnost měření,
- opakovatelnost měření,
- variabilita průměru vláken,
- náročnost obsluhy,
- modifikace (možnost budoucích úprav, případné rozšíření o další funkce),
- cena.

Vzhledem k tomu, že zvolená kritéria mají různou míru významnosti pro výběr vhodné alternativy, je nutné provést vzájemné porovnání. Pro vzájemné porovnání míry významnosti vybraného kritéria oproti ostatním je použita metoda párového srovnání v tab. 2, kde z trojúhelníkového diagramu je stanovena četnost výskytu každého z kritérií a pořadí jejich významnosti. Tyto hodnoty jsou zaneseny do tab. 1, kde je následně stanovena váha každého kritéria (váha=počet voleb + pořadí významnosti). V tab. 1 je použita fiktivní alternativa č. X, která splňuje všechna kritéria na 100% a všem kritériím je přiřazena prostá hodnota 100. Vážená hodnota každého kritéria se rovná násobku prosté hodnoty a váhy příslušného kritéria.

Rozhodovací analýza je provedena tak, že ke každé alternativě řešení (č.1, č.2, č.3) jsou přiřazeny prosté hodnoty pro jednotlivá kritéria, která jsou subjektivním posouzením míry splnění požadovaného kritéria danou alternativou řešení. Vážená hodnota je pak násobkem váhy kritéria a příslušné prosté hodnoty. Součet vážených hodnot kritérií pro každou alternativu řešení slouží k výslednému výběru vhodné alternativy. [27]

Rozhodovací analýzou mezi třemi alternativami dle šesti výše uvedených kritérií byla vybrána za nejvíce vyhovující varianta č. 3.

VÝBĚR VHODNÉHO KOREKCE POHYBOVÉ SEKvence												
PÁROVÉ SROVNÁVACÍ KRITÉRIUM					č.X		č.1		č.2		č.3	
Poř. Číslo	Kritérium	Počet voleb	Pořadí významnosti	Váha	p.h	v.h	p.h	v.h	p.h	v.h	p.h	v.h
1	Přesnost měření	5	1	6	100	600	70	420	80	480	90	540
2	Opakovatelnost měření	4	2	5	100	500	70	350	80	400	90	450
3	Variabilita průměru vláken	3	3	4	100	400	80	320	85	340	85	340
4	Náročnost obsluhy	2	4	3	100	300	65	195	75	225	70	210
5	Modifikace	1	5	2	100	200	60	120	75	150	90	180
6	Cena	0	6	1	100	100	60	60	70	70	60	60
CELKEM						2100		1465		1665		1780
UŽITNOST V RELATIVNÍM VYJÁDŘENÍ (%)												
POŘADÍ ALTERNATIV PODLE UŽITNOSTI								<b>3.</b>		<b>2.</b>		<b>1.</b>

Tab. 1. Výsledky rozhodovací analýzy

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
1.		1	1	1	1	1
2.			2	2	2	2
3.				3	3	3
4.					4	4
5.						5
6.						

Tab. 2 Párový test významnosti

Metoda rozhodovací analýzy sice není zcela exaktní, protože se známky udělují intuitivně, ale pro tyto účely je dostačující. [27]



### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

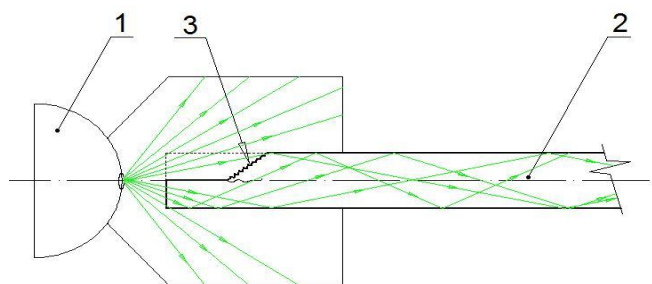
V experimentální části je uveden návrh metodiky měření napřímených a ohnutých optických vláken. Jsou zde uvedeny výsledky měření na navržených zařízeních a jejich zhodnocení. Rovněž byly vytvořeny simulace v programu Zemax, které popisují průběh světelného útlu ve tkaninách při různém stupni zvlnění.

#### **3.1 Metody měření**

Byla navržena metoda měření napřímeného optického vlákna a metoda měření optického vlákna v ohybu. Metoda měření napřímených optických vláken byla vytvořena ve spolupráci s Fakultou mechatroniky, informatiky a mezioborových technologií, Technické univerzity v Liberci. Zařízení pro měření ohýbaných optických vláken bylo zkonstruováno dle vlastního návrhu.

##### Příprava optických vláken

Před začátkem samotného měření je zapotřebí připravit plochu řezu, která bude osvětlena. To je u obou metod stejné. Vláknem je nejprve odděleno od cívky. Vhodný způsob je za použití ostrého nástroje. Těmito nástroji mohou být štípací kleště, pro malé průměry stačí ostré nůžky. Pokud by se vlákno oddělovalo nekvalitním nástrojem, došlo by k odštípnutí hrany. V důsledku toho by osvětlovací plocha nebyla úplná a pohltila by méně vyslaných paprsků viz obr. 38.



.Obr. 38 Odštípnutí osvětlovací plochy

1 – zdroj světla, 2 – optické vlákno, 3 – odštípnutá hrana

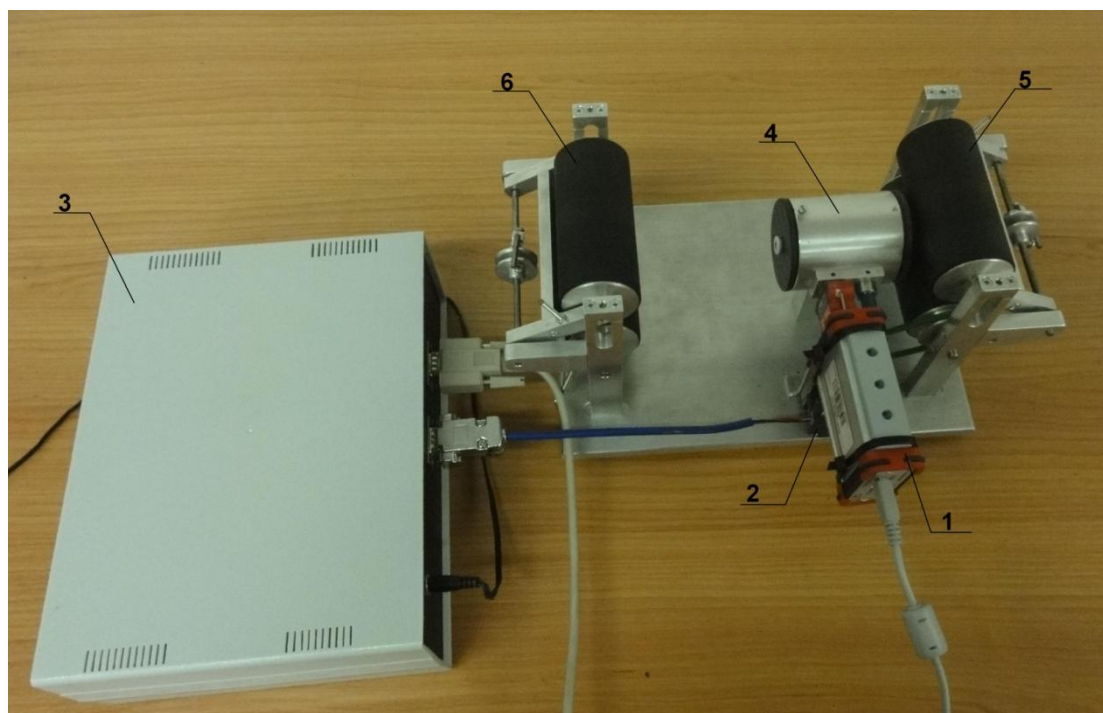
Poté, co je vlákno odděleno, je zapotřebí plochu zahladit. To se provádí za pomoci série brusných papírů a následně se zaleští diamantovým práškem, který se běžně používá pro

zaleštění optických čoček. Při broušení je důležité, aby vlákno bylo kolmé k brusnému papíru a také aby bylo zaleštění provedeno stejnoměrně u všech měřených vzorků.

Po zabroušení a zahlázení plochy optického vlákna je vlákno přivedeno ke zdroji světla. Je zapotřebí vlákno urovnat tak, aby pohltilo co nejvíce paprsků světla, které ze zdroje vystupují. Měření u obou metod je zapotřebí provádět v temné komoře, aby nedošlo k ovlivnění světelného senzoru.

### 3.1.1 Metoda měření světelné intenzity napřímených optických vláken

Zařízení bylo zkonstruováno dle návrhu v kapitole 2.2.1.1. Zařízení je na obr. 39. Návrh zařízení byl vytvořen ve spolupráci s Fakultou mechatroniky, informatiky a mezioborových technologií Technické univerzity v Liberci.

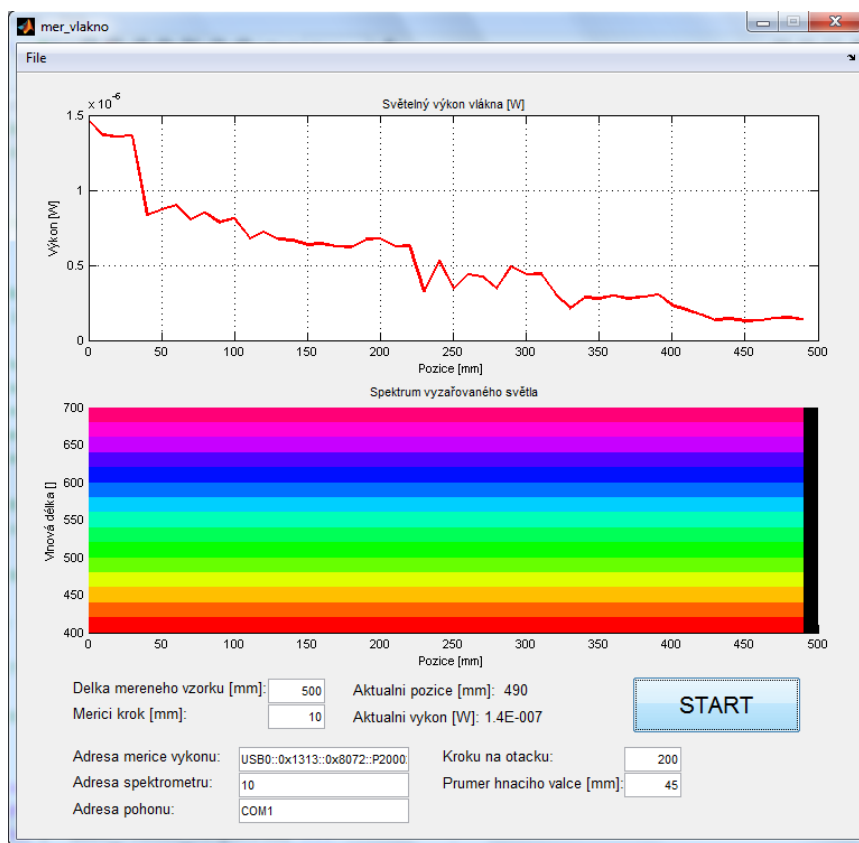


Obr. 39 Zařízení pro lineární vedení optických vláken

1 – snímač světelné intenzity, 2 – krokový motor, 3 – řídicí jednotka, 4 – měřicí tunel, 5 – odtahovací válečky, 6 – válečky k vedení vzorku

Samotné měření probíhá tak, že vlákno, které je již připojeno k osvětlovacímu zařízení, je navedeno mezi odtahovací válečky, následně skrz měřicí tunel a mezi vodící válečky. Jako krokový motor byl zvolen MSHC 100B41 Sankyo. Pro měření světelného výkonu byl použit senzor THOR LABS PM 1000 SB. Měření začne spuštěním počítačového

programu, který je vytvořen v systému Matlab. Program otevře ovládací tabulku, kde je možné nastavit parametry: délku měření a délku kroku. Tato tabulka je na obr. 40. Po nastavení všech parametrů se měření spustí tlačítkem Start. Když je měření dokončeno, musí se naměřené hodnoty manuálně uložit. Každé měření se uloží jako soubor programu Excel.

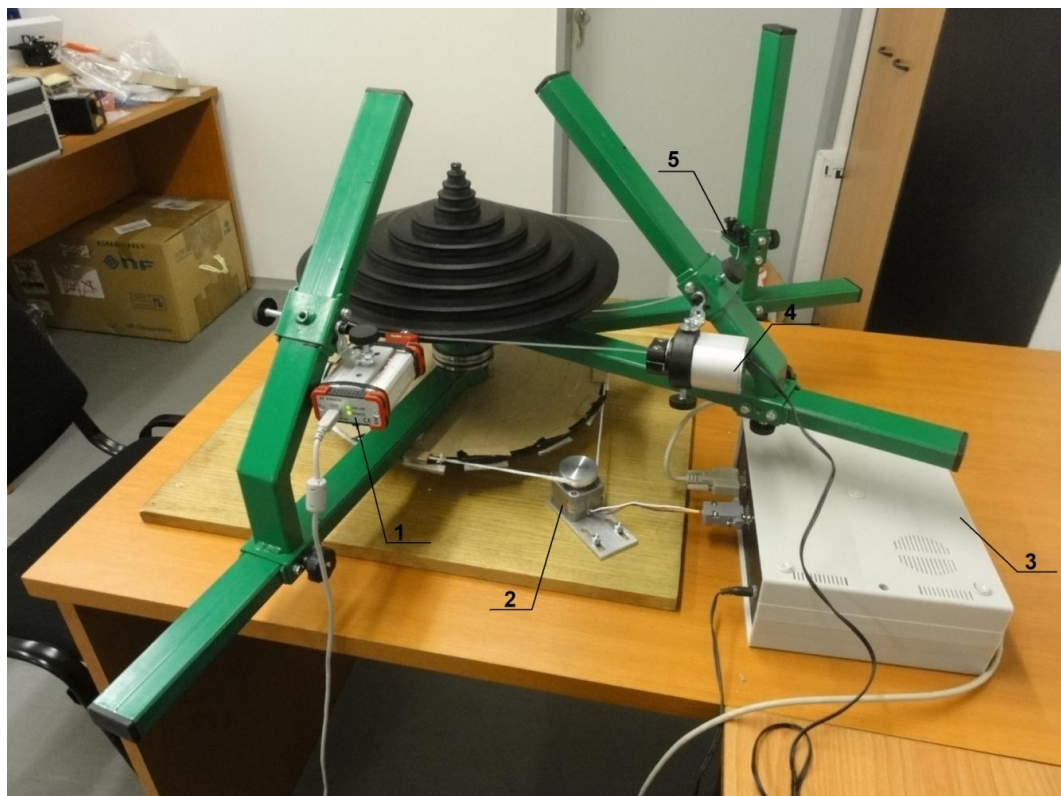


Obr. 40 Ovládací programová tabulka

### 3.1.2 Metoda měření světelné intenzity v místě ohybu optických vláken

Zařízení bylo zkonstruováno dle návrhu v kapitole 2.2.2.2, kde byla zvolena varianta č. 3. Zařízení je řízeno stejným počítačovým programem a používá stejný senzor jako zařízení pro měření napřímených vláken. Měření probíhá na sadě kotoučů, které umožňují měřit světelnou intenzitu na povrchu optických vláken při různých rádiusech. Zařízení je na obr. 41.





Obr. 41 Zařízení pro měření světelných ztrát v ohybu

1 – senzor, 2 – krokový motor, 3 – řídicí jednotka, 4 – zdroj světla, 5 – upínka

Po úpravě osvětlovací plochy vlákno navedeme ke zdroji světla a „pevně“ k němu upevníme. Poté vlákno napneme po obvodu kotouče daného rádiusu a vlákno na druhém konci upneme do upínky. Pro vedení vlákna po obvodu kotouče slouží vodící drážka kotouče. Při měření je řada faktorů, které mohou ovlivnit naměřené výsledky. Při měření by měly být dodrženy následující podmínky:

- osa vlákna a osa senzoru musí být v jedné rovině,
- vzdálenost mezi senzorem a optickým vláknem by měla být co nejmenší, (doporučení dle získaných zkušeností je 1-2 mm od optického vlákna),
- zdroj světla a upínka musí být v jedné rovině s používaným kotoučem,
- vzdálenost od zdroje světla k místu kde vlákna přechází v ohyb by měla být vždy stejná.

Poté co je zařízení nastaveno, tak aby splňovalo výše uvedené podmínky, se zapne již zmíněný program.

Měřicí zařízení se skládá ze sady kotoučů. Tyto kotouče lze dle potřeb měření libovolně obměňovat. V následující tabulce č. 3 jsou uvedeny rádiusy jednotlivých kotoučů.

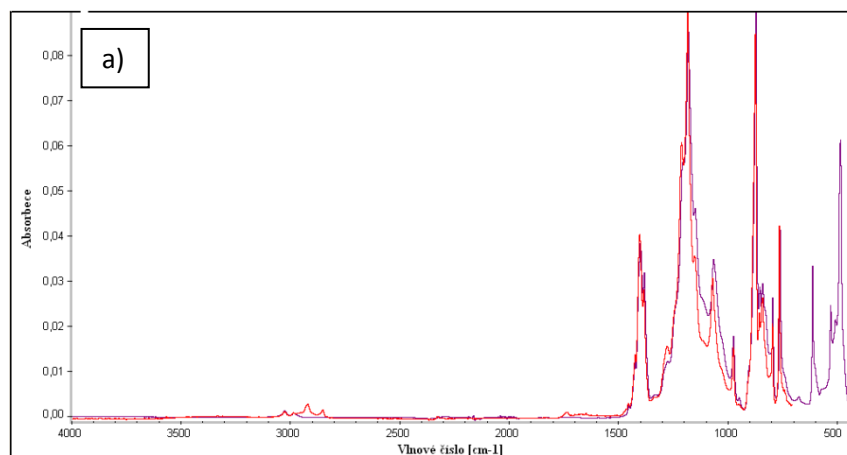
Číslo kotouče	Poloměr [mm]	Číslo kotouče	Poloměr [mm]
1.	175	6.	50
2.	150	7.	25
3.	125	8.	20
4.	100	9.	15
5.	75	10.	10

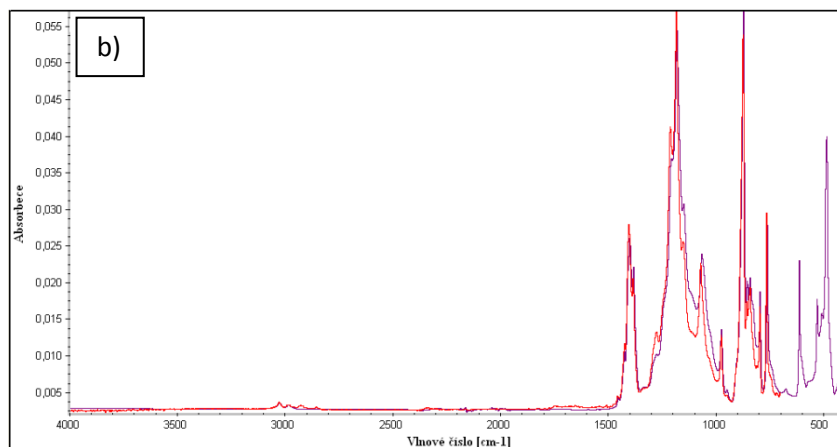
Tab. 3 Velikost rádiusů zvolených kotoučů

### **3.2 Charakteristika měřených vláken**

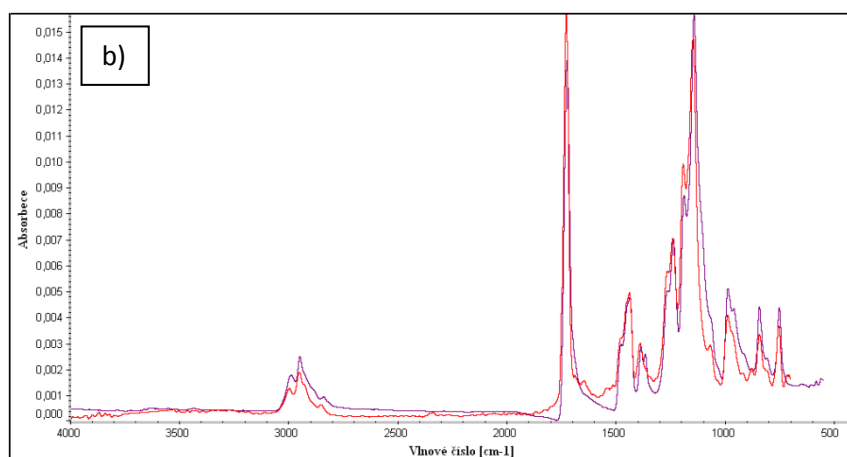
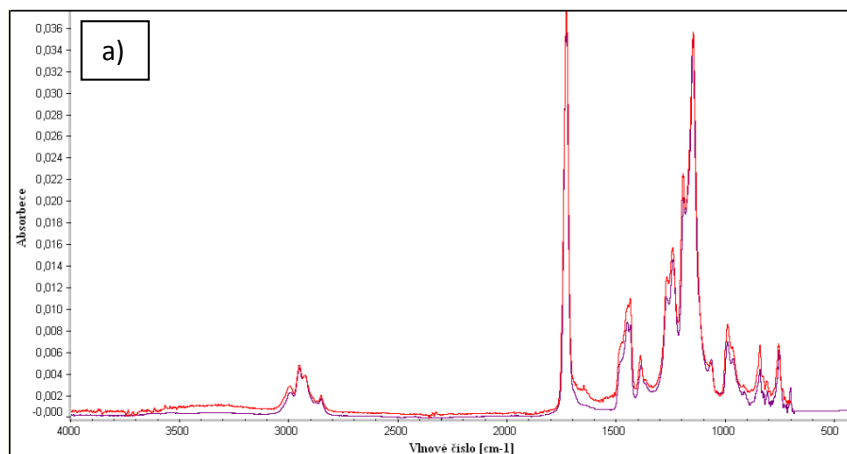
Pro měření byla zvolena optická vlákna od firmy Grace a Hypoff. Byla zvolena optická vlákna o průměru 0,5; 0,75; 1; 1,2; 1,5 mm. Materiálové složení těchto vláken bylo zjištěno za pomoci FTIR spektrometrií technikou ATR. FTIR je technika k určení materiálového složení založená na měření pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem. Principem metody je absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem, při níž dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie. [28]

Výsledky z FTIR jsou na obr. 42 a) a b), a obr. 43 a) a b) z analýzy vyplývá, že optická vlákna od výrobce Grace i Hypoff mají stejné složení. Optická vlákna obsahují v jádře PMMA a v obalu polykarbonát.





Obr. 42 a) Výsledky FTIR obalu Grace b) Výsledky FTIR obalu Hypoff [29]



Obr. 43 a) Výsledky FTIR jádra Grace b) Výsledky FTIR jádra Hypoff [29]

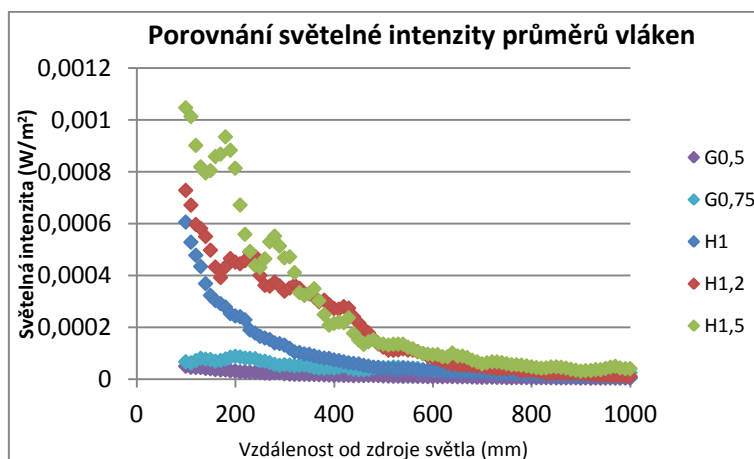
### 3.3 Výsledky měření

Byla provedena měření na obou typech zařízení. Pro obě měření byl použit stejný zdroj světla. V následující kapitole jsou uvedeny výsledky měření a jejich komentář.

#### 3.3.1. Výsledky měření napřímených optických vláken

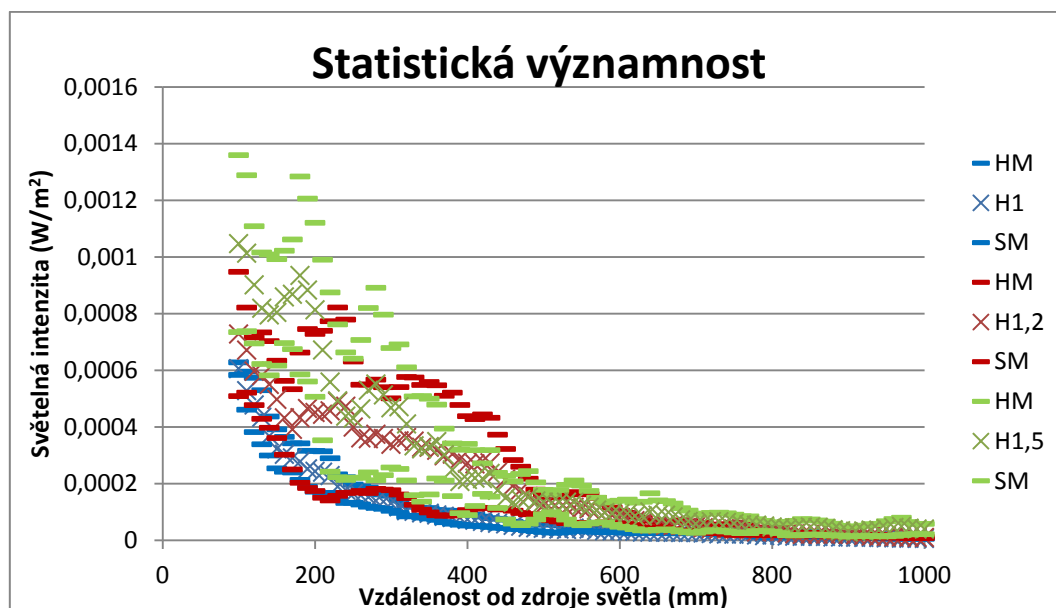
Bylo provedeno měření na vláknech Hypoff 1; 1,2 a 1,5 mm, a Grace 0,5 a 0,75 mm. Měření začíná 200 mm od zdroje světla a je měřeno v délce 1 metru po kroku 10 mm. Níže jsou uvedeny grafické porovnání úbytku světelné intenzity jednotlivých průměrů v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla. Je zapotřebí uvést, že snímač měří světelný výkon (W). Hodnota se převede na světelnou intenzitu ( $\text{W/m}^2$ ) tak, že se každá naměřená hodnota se vynásobí 76 923. Číslo bylo vyvozeno od plochy senzoru, která je  $13,3 \text{ mm}^2$ .

Graf 3 znázorňuje porovnání světelné intenzity různých průměrů optických vláken v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla. Z grafu vyplývá, že s rostoucím průměrem se zvyšuje i světelná intenzita na povrchu optického vlákna. Z grafu lze také vyvodit, že s rostoucí vzdáleností od zdroje světla světelná intenzita klesá. U větších průměrů světelná intenzita klesá rychleji než u vláken s malými průměry.

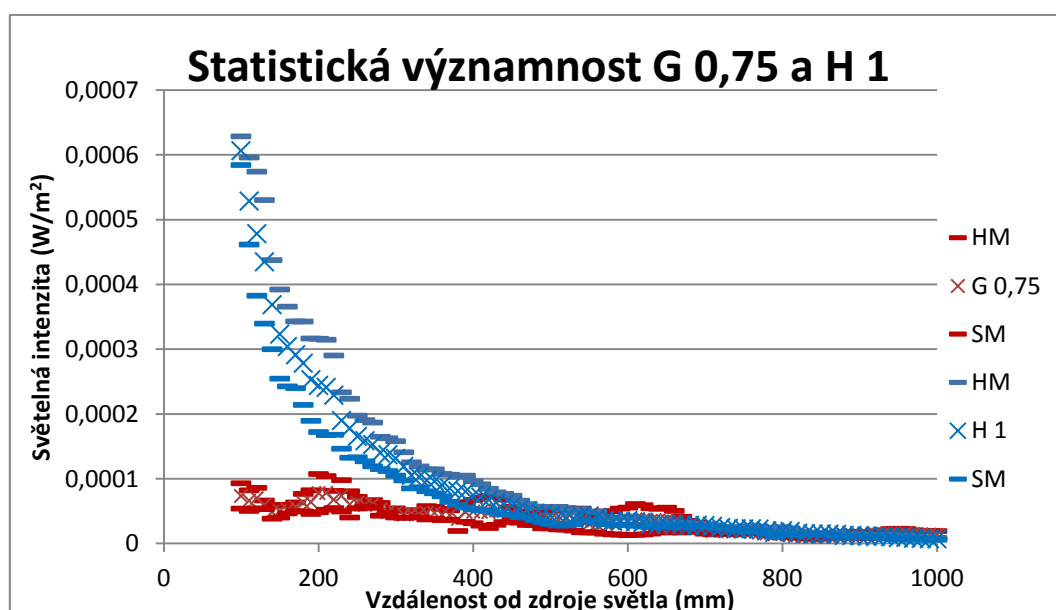


Graf 3 - Porovnání světelné intenzity různých průměrů optických vláken

Bylo provedeno ověření statistické významnosti naměřených dat. Ukázka ověření je na grafu 4.1. Z grafu vyplývá, že data jsou statisticky nevýznamnými mezi průměry 1;1,2 a 1,5 a mezi průměry 0,5;0,75, protože jejich horní (HM) a dolní (DM) meze 95 % konfidenčního intervalu se překrývají. Statistická významnost je mezi skupinou průměrů 1;1,2; a 1,5 a skupinou 0,5 a 0,75 viz graf 4.2, kde je vidět že data jsou statisticky významná.



Graf 4.1 – Porovnání statistické významnosti naměřených dat



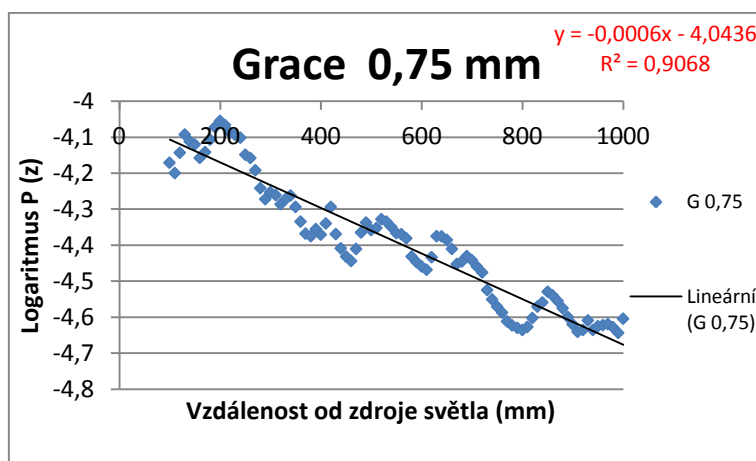
Graf 4.2 – Porovnání statistické významnosti naměřených dat

Podrobnější výsledky měření napřímených vláken uvedeny v příloze č. 1. V příloze jsou uvedeny grafické výsledky měření na jednotlivých průměrech. V grafech jsou uvedeny průměry z 10 měření, horní (HM) a dolní (DM) meze 95% konfidenčního intervalu. Tabulky naměřených hodnot jsou přiloženy pouze v elektronické podobě.

Bylo provedeno měření na několika typech optických vláken od různých výrobců. Měření jsou podrobně popsána ve zprávě Katedry textilních technologií k projektu FR II/242 – Opticky aktivní bezpečnostní textilie pro rok 2010 a 2011. [30,31].

Pro další studie je zapotřebí zjistit hodnotu koeficientu útlumu  $\alpha$  stranově vyzařujících optických vláken a hodnotu  $P_0$ . Postup pro nalezení těchto dvou parametrů lze provést následovně:

- na základě lineární regrese nalezneme parametr exponenciální funkce světelné intenzity. Postup je neznačen v grafu 5. V grafu 5 je lineární regrese optického vlákna od firmy Grace o průměru 0,75 mm. Intenzita vyzařování před logaritmicizací byla ve  $[W/m^2]$ . Zbýlé grafy jsou uvedeny v příloze č. 3.



Graf 5 – Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu

- Pro následný výpočet byl použit vztah (12) odvozený z rovnice (3). Kde  $P_0$  je světelná intenzita na počátku měření tedy kde  $z=0$ .

$$\log P_z = \frac{-\alpha z}{10} + \log(P_0) \quad (12)$$

- Intenzita vyzařování na vstupu do vlákna  $P_0$  (13) a koeficient útlumu  $\alpha$  (14), byly vypočteny ze směrnice regresní přímky  $k$  a posunutí  $q$  (graf 5) dle vztahu:

$$P_0 = 10^q \quad (13)$$

$$\alpha = -10k \quad (14)$$

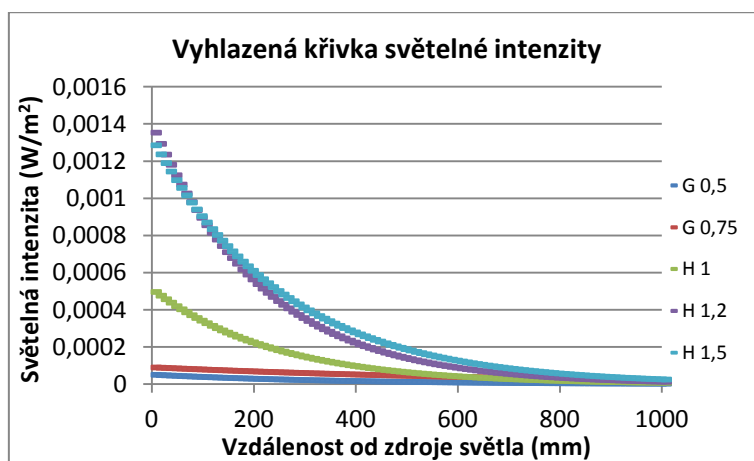
Parametr  $P_0$  udává velikost světelné intenzity na povrchu optického vlákna u zdroje světla.  $P_0$  udává, v jaké výšce na ose y bude začínat exponenciální průběh. Koeficient útlumu

$\alpha$  udává, jakou bude mít exponenciála strmost. Parametry exponenciálních funkcí jsou uvedeny v tabulce 4.

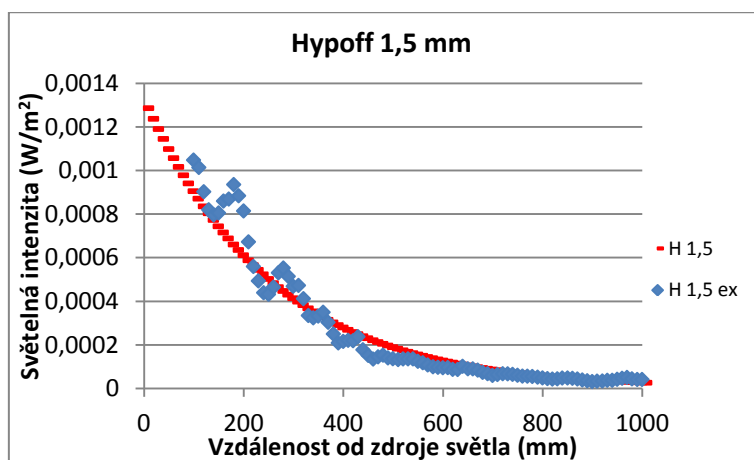
	$\alpha$	P0
<b>GRACE</b>		
<b>0,5 mm</b>	0,012	5,1E-05
<b>0,75 mm</b>	0,006	9,04E-05
<b>HYPOFF</b>		
<b>1 mm</b>	0,018	0,000497
<b>1,2 mm</b>	0,02	0,001354
<b>1,5 mm</b>	0,017	0,001286

Tab. 4 Výsledné hodnoty  $\alpha$  a  $P_0$

Na grafech 6.1 a 6.2 jsou uvedeny experimentální a vyhlazené světelné intenzity vyzařování na povrchu vláken.



Graf 6.1 Vyhlazené hodnoty světelné intenzity

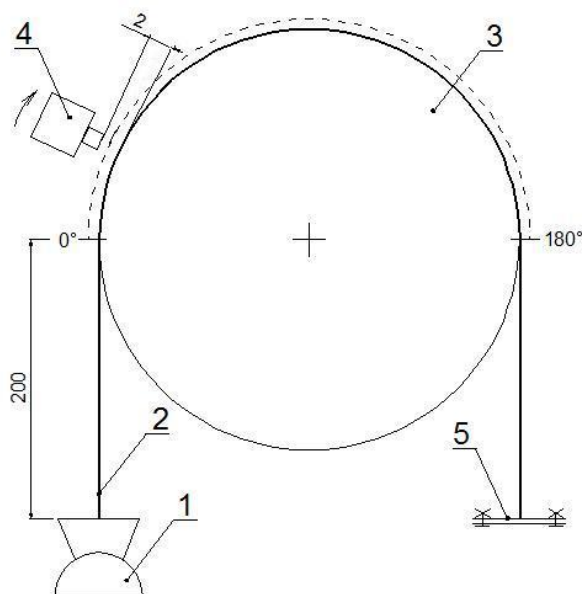


Graf 6.2 Exponenciální a vyhlazená křivka světelné intenzity

### 3.3.2. Výsledky měření ohnutých optických vláken

Bylo provedeno první měření na vláknech Hypoff 1,2; 1,5 mm a Grace 0,75 a 1 mm. Měření se provádělo na kotoučích o rádiu 175, 100 a 20 mm.

Měření se provádělo v úhlu  $180^\circ$  s krokem  $2\frac{1}{2}^\circ$  pro každý kotouč. Senzor od měřeného vlákna byl 2 mm a světelný zdroj byl od počátku měření vzdálen 200 mm. Na obr. 44 je schematicky zobrazeno nastavení pro měření v této práci.



Obr. 44 Schéma postupu měření

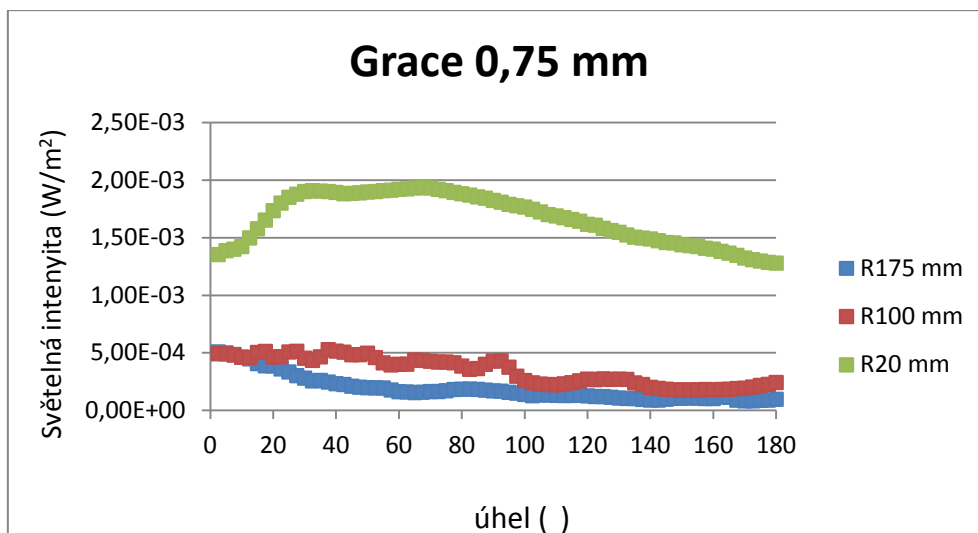
1 – zdroj světla, 2 – optické vlákno, 3 – kotouč, 4 – senzor, 5 – upínka

Na následujících obrázcích jsou uvedeny výsledky měření v grafické podobě. Bylo provedeno 8 měření a následně byla provedena základní statistika. V první sérii grafů je uveden vliv použitých rádiuů na jednotlivé průměry vláken. V druhé sérii obrázků jsou grafy, které porovnávají vliv jednotlivých rádiuů na světelný výkon průměrů optických vláken.

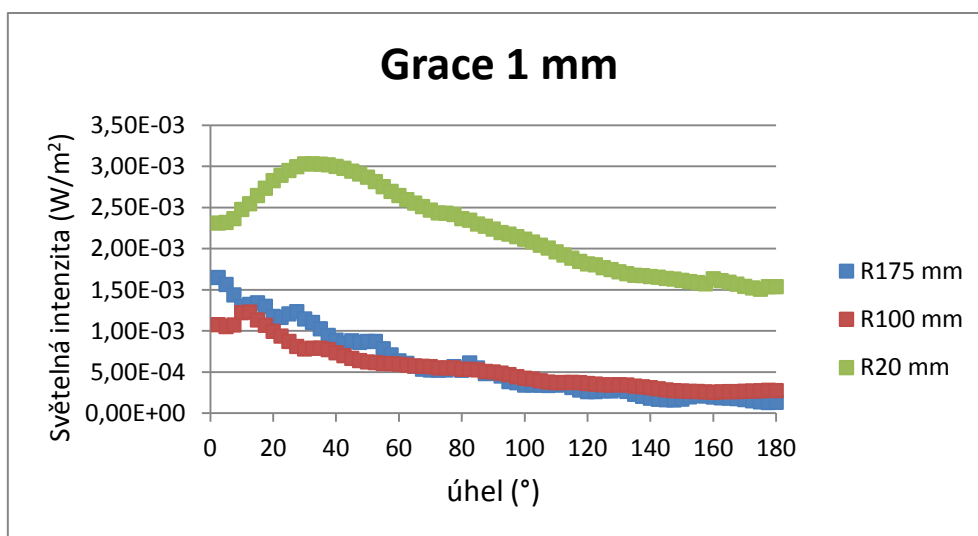
Z Grafů 7.1 až 7.4 vyplývá, že čím je rádiu menší, tím je světelná intenzita v místě ohybu na povrchu vlákna vyšší. To je zřejmé z měření ohybu vlákna o rádiu 20mm, kdy dojde k vyvázání většího množství přenášeného světla vlivem překročení kritického poloměru zakřivení vlákna viz rovnice [8]. Při měření ohybu vlákna o rádiu 175 a 100 mm již k překročení kritického poloměru zakřivení nedojde, přesto lze říci, že světelná intenzita na povrchu měřených vláken ve vztahu k vzdálenosti od zdroje je vyšší než světelná intenzita na



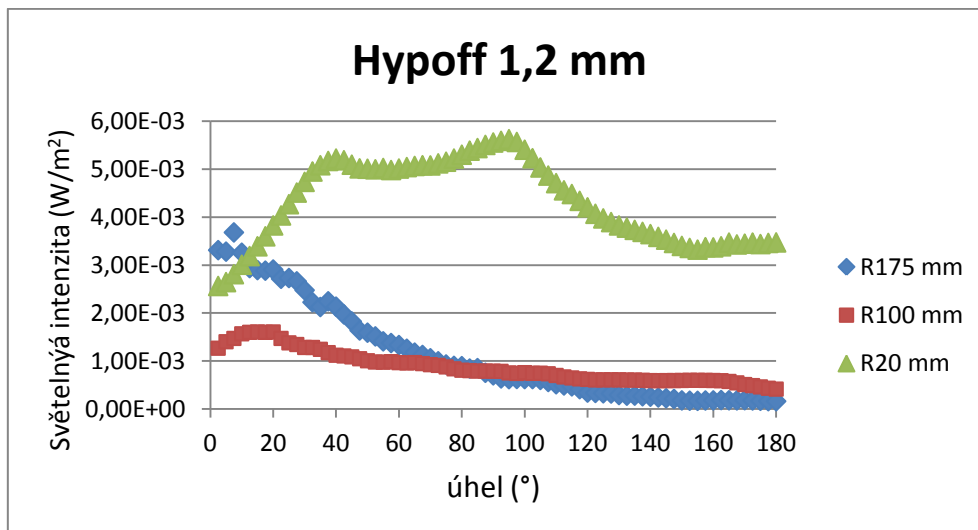
povrchu vláken napřímených. Této skutečnosti lze využít při návrhu zakomponování optických stranově vyzařujících vláken do textilních struktur a využít tak jejich svítivosti na povrchu.



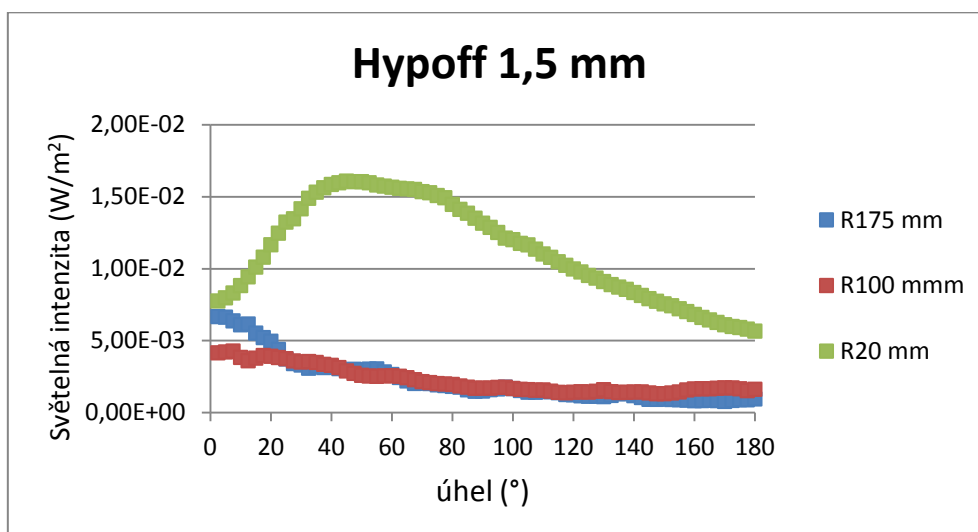
Graf 7.1 - Světelný výkon Grace 0,75 při různých rádiusech



Graf 7.2 - Světelný výkon Grace 1 při různých rádiusech

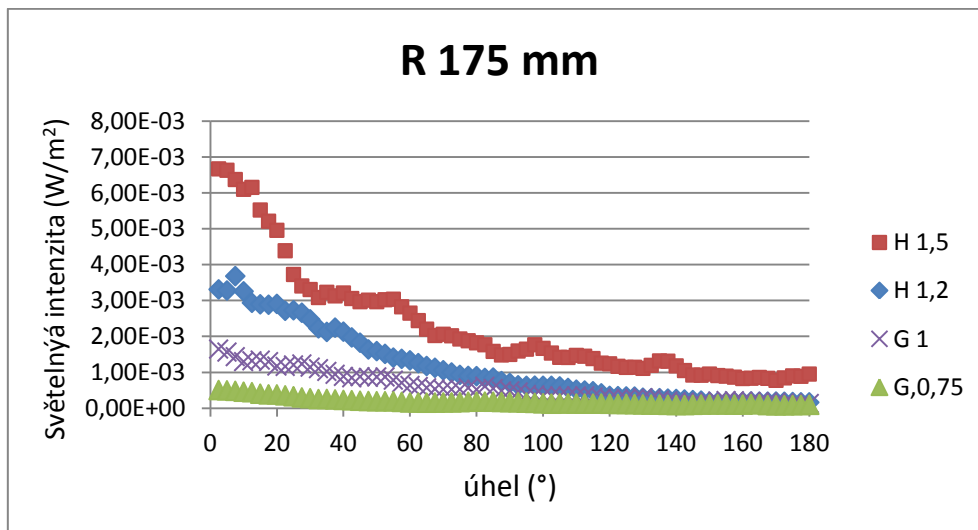


Graf 7.3 - Světelný výkon Hypoff 1,2 při různých rádiusech

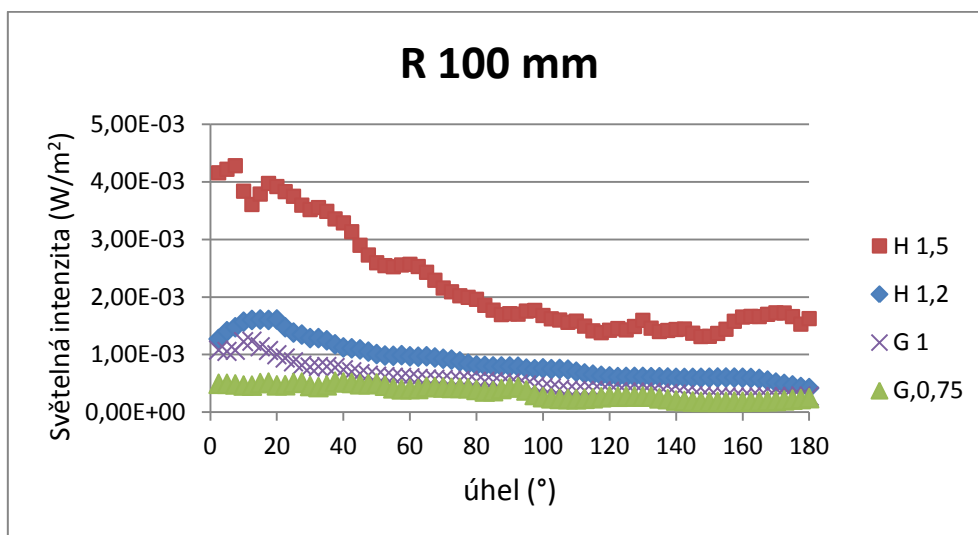


Graf 7.4 - Světelný výkon Hypoff 1,5 při různých rádiusech

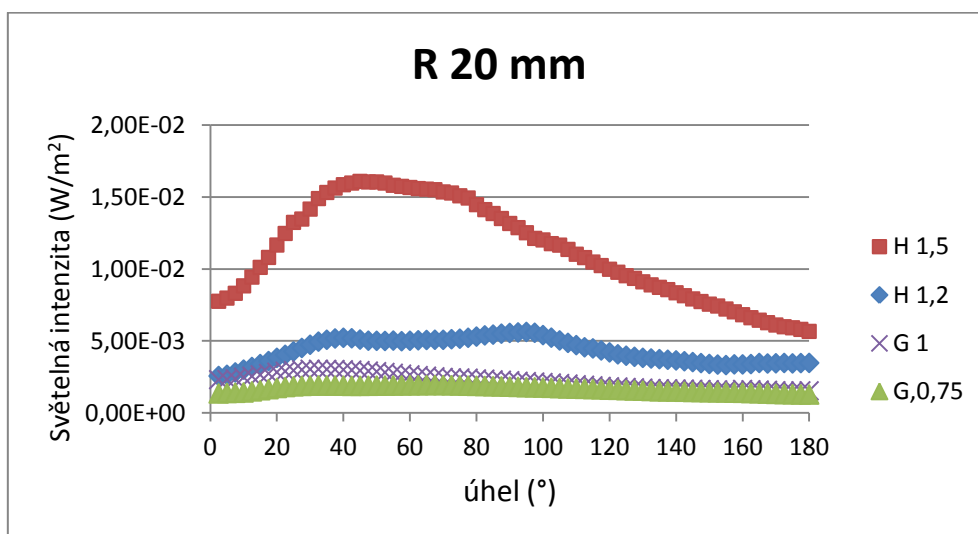
Na grafech 8.1 až 8.3, jsou uvedeny výsledky měření porovnávající světelnou intenzitu jednotlivých průměrů při stejném rádiu. Z grafů vyplývá, že platí stejný jev jako u napřimených vláken, že čím je průměr optického vlákna větší tím více na povrchu svítí.



Graf 8.1 - Světelný výkon při rádiu 175 mm



Graf 8.2 - Světelný výkon při rádiu 100 mm



Graf 8.3 - Světelný výkon při rádiu 20 mm

V příloze 2 jsou uvedeny podrobné grafy jednotlivých měření s horní (HM) a dolní (DM) meze 95% konfidenčního intervalu a tabulky naměřených hodnot.

### **3.3.3. Zhodnocení použitých metod**

Obě vyvinuté metody jsou ve zkušebním provozu. Proto se během měření vyskytlo několik nedostatků. U metody měření napřímených optických vláken mezi nedostatky patří absence odtahového zařízení zdroje světla. Odtah světelného zdroje od senzoru se provádí ručně. Další nedostatek byl v nepřesném uložení odtahovacích válečků, což způsobilo, že optické vlákno se buď k senzoru přibližovalo nebo oddalovalo. Tento negativní jev jsme odstranili pomocí dvou vodících drážek upevněných na uložení páky (viz. obr.34 resp. obr.39).

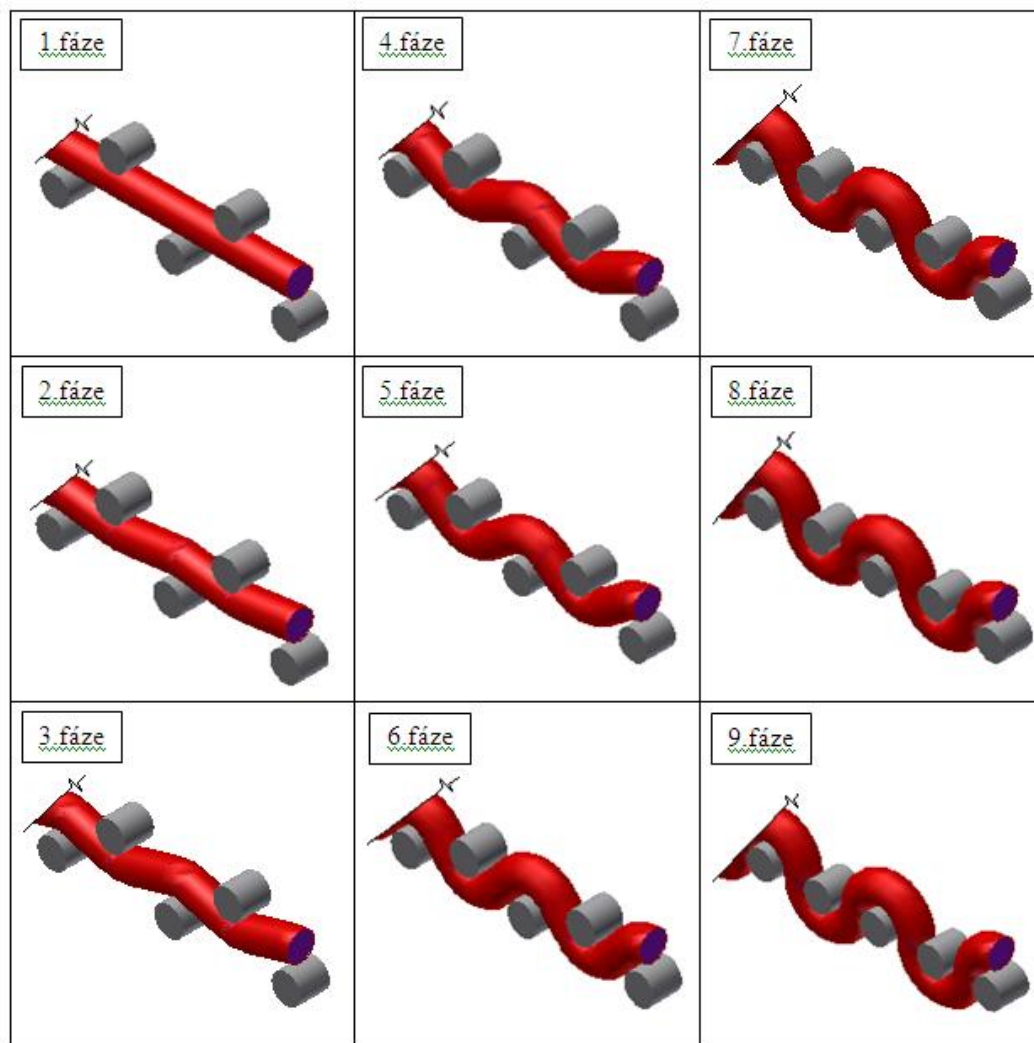
U metody měření světelné intenzity v ohybu bylo zapotřebí vyřešit problém spojený s krokovým motorem, který nebyl schopen plnit svoji funkci při daném převodu, který vycházel z konstrukce zařízení. Proto bylo nutné převod zvětšit. Mezi další negativa patří zdlouhavost přípravy na měření. Před každým měřením je zapotřebí nastavit vzdálenost zdroje světla od počátku měření, vzdálenost mezi senzorem a měřeným vláknem, výšku senzoru, zdroje světla a upínky. Zdlouhavost je možno odstranit vytvořením drážek k přesnému polohování senzoru, zdroje světla a upínky pro každé měření na příslušných kotoučích.

## **3.4 Simulace zvlnění nití ve tkanině**

Pro simulaci mikroohybu v textilních strukturách byla zvolena tkaná struktura. Vzhledem k velké tuhosti větších průměrů optických vláken není možné reálně dosáhnout vyšších fází zvlnění. Proto se při vypracování modelů neuvažovalo s tuhostí optických vláken v ohybu.

Pro nasimulování světelného výkonu byl použit optický simulační program ZEMAX. Bylo použito zvlnění podle Novikova. V programu Inventor byly vytvořeny modely zvlnění nití, dle Novikovy předlohy viz obr. 45. Byl definován:

- průměr jádra (0,9 mm)
- průměr pláště (0,1 mm)
- míra zvlnění (1-9 fáze dle Novikova)
- délka modelu (40 mm)



Obr. 45 Modely zvlnění nitě ve tkanině vytvořené v programu Inventor

Tyto modely byly načteny do programu Zemax. Zde se modelu přidaly další vlastnosti:

- Výkon osvětlení (1W)
- Index lomu jádra (1,58)
- Index lomu pláště (1,49)
- Kapacita snímače (obvod 24 pixelů, délka 200 pixelů)
- Druh rozptylu odražených paprsků ( Lambertovský rozptyl – náhodný všechny směry odražených paprsků mají stejnou pravděpodobnost)
- Poškrábání povrchu světlovodného vlákna je reprezentováno také Lambertovským rozptylem (5% z celkového počtu paprsků je rozptýleno)

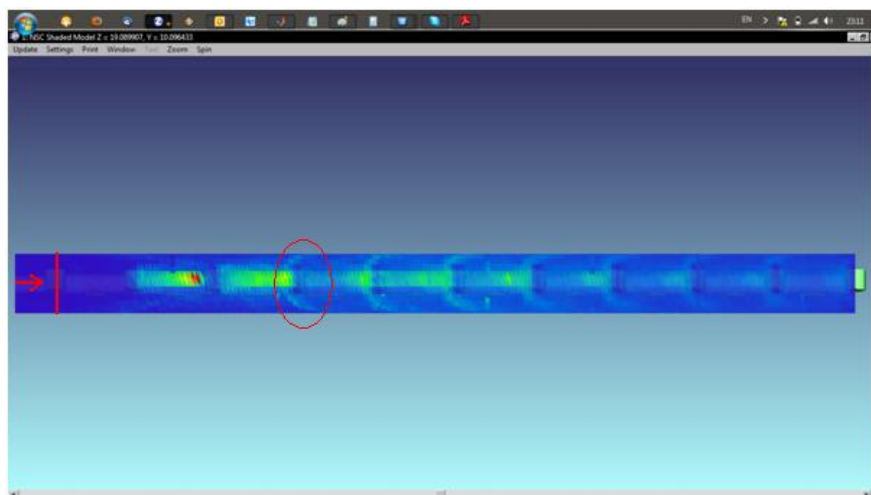
- Povrch podpůrného vlákna je definován jako ideálně difuzní (100% z dopadnutých paprsků je rozptýleno)

Jedním z majoritních vlivů na výsledek simulace má míra poškrábání povrchu. V simulaci, je tento jev reprezentován, právě procentuálním zastoupením rozptýlených paprsků. Výše uvedené vlastnosti však nejsou zavazující pro jiné simulované modely, kde se můžou vlastnosti upravit dle potřeb nové simulace.

### 3.5.1 Výstup simulací

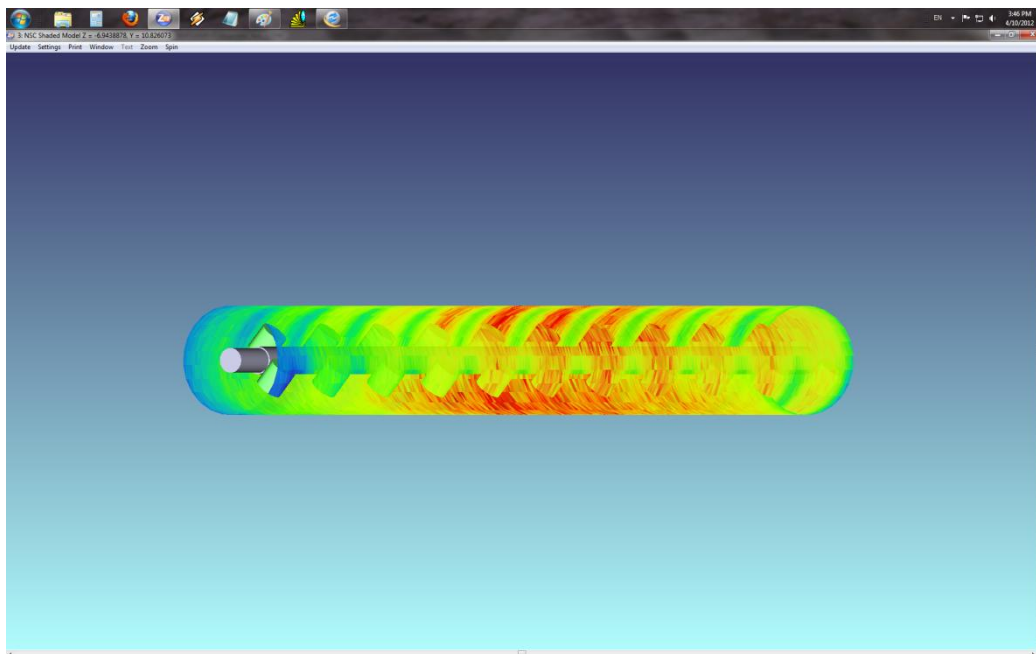
Simulace demonstruje výkon světelné intenzity na povrchu tkaniny. Pro každý model zvlnění dle Novikova, je nasimulován pohyb senzoru, který rotuje kolem modelu. Senzor se po každé rotaci o  $360^\circ$  posune o nadefinovanou délku v ose modelu. Model obsahuje jedno optické vlákno, které je kříženo v plátnové vazbě 20 nitěmi. Výstupem je válec představující výkon světelné intenzity změřené při pohybu senzoru podél osy modelu.

Ukázka vytvořených simulací je na obr. 46.1 a 46.2. Na obrázku 46.1 je ukázka 2. fáze zvlnění dle Novikova. Červenou šipkou je znázorněn vstup světla do optického vlákna. Simulace odhalila neočekávaný jev. Jev je na obrázku vyznačen červenou kružnicí. Ta ukazuje, že druhá soustava nití blokuje vyzářené paprsky v jejich přirozené trase. Ty jsou pak vidět jako „půlměsíčky“ před každou přídavnou nití.



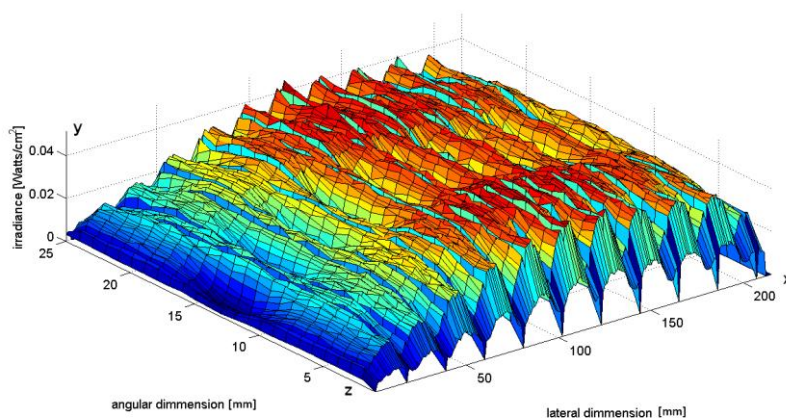
Obr. 46.1 Simulace 2.fáze zvlnění pohled na model z vrchu

Na obr. 46.2 je vidět, že pokud není optické vlákno ve tkanině zvlněno, svítí rovnoměrně v celé délce simulovaného modelu. Platí zde však, že světelná intenzita na povrchu optických vláken se vzdáleností od zdroje světla klesá.

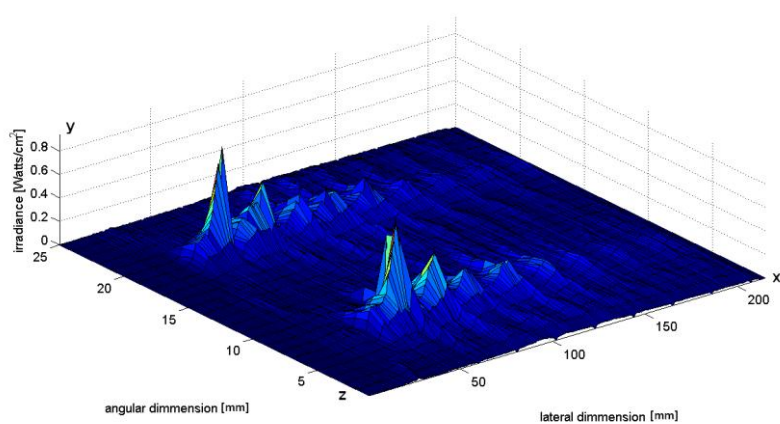


Obr. 46.2 Simulace 1. fáze zvlnění

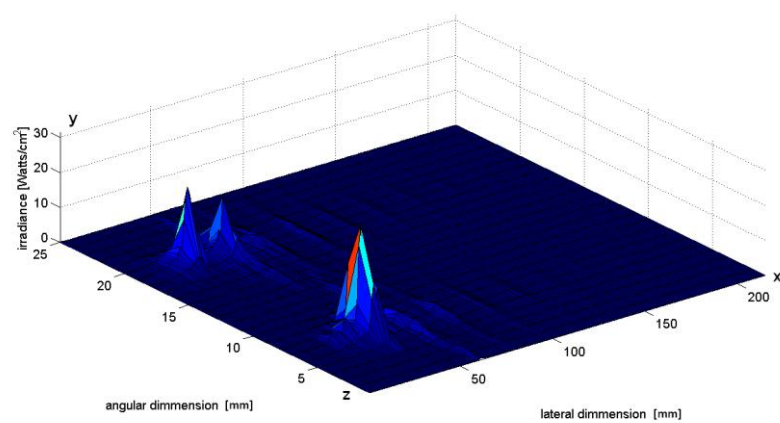
Zbylé modely jsou uvedeny v příloze č. 4. Další vyhodnocení nasbíraných dat bylo provedeno v programu Matlab. Výstupem jsou následující grafy 9.1 až 9.9. Osa  $x$  v grafu znázorňuje délku měřeného modelu, osa  $y$  je velikost světelné intenzity a osa  $z$ , představuje délku rozbaleného senzoru. Velikost světelné intenzity je barevně zvýrazněna. Čím má barva větší vlnovou délku, tím je světelná intenzita v daném místě větší.



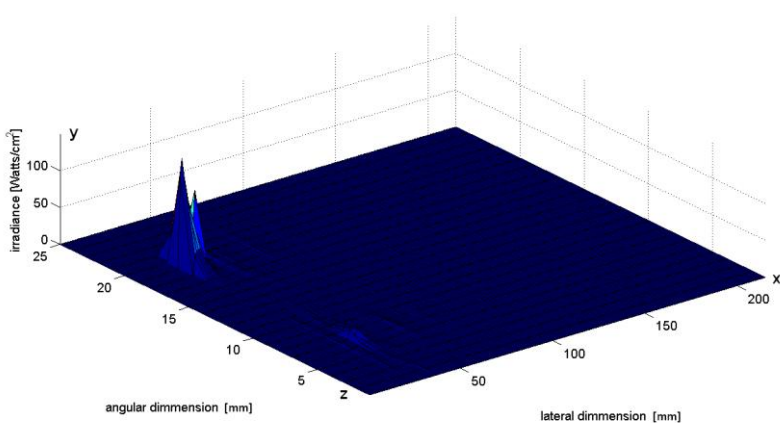
Graf 9.1 - Světelný výkon 1. fáze zvlnění



Graf 9.2 - Světelný výkon 2. fáze zvlnění

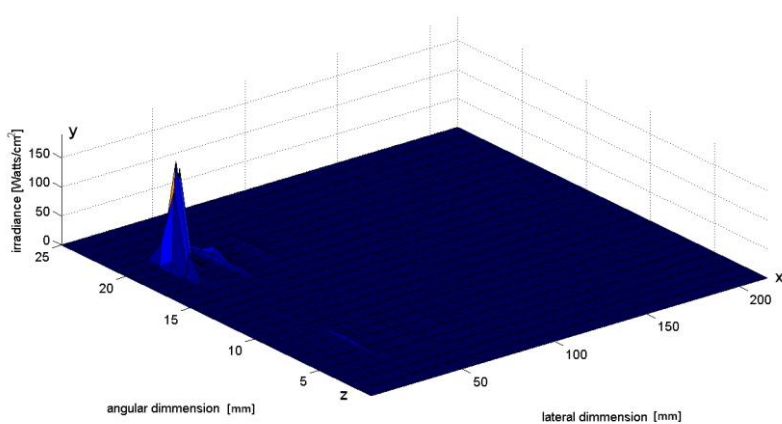


Graf 9.3 - Světelný výkon 3. fáze zvlnění

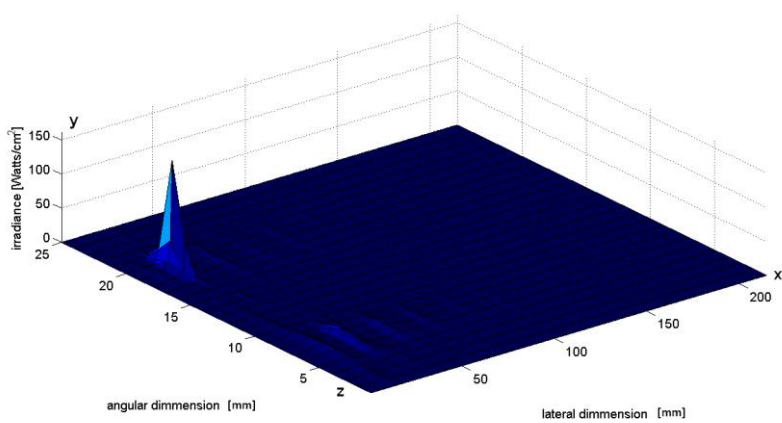


Graf 9.4 - Světelný výkon 4. fáze zvlnění

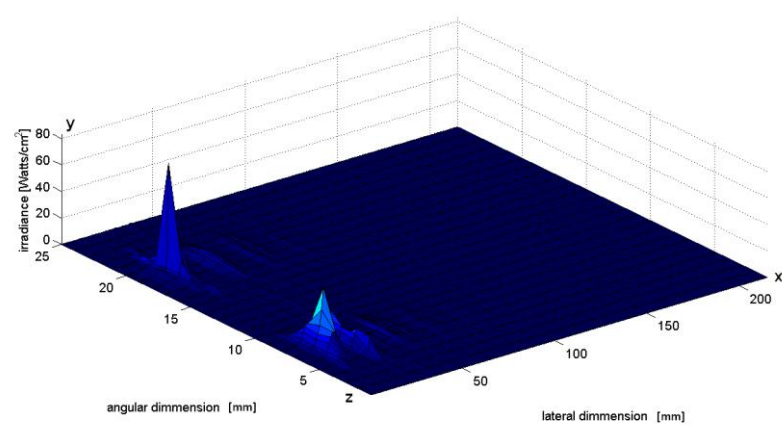




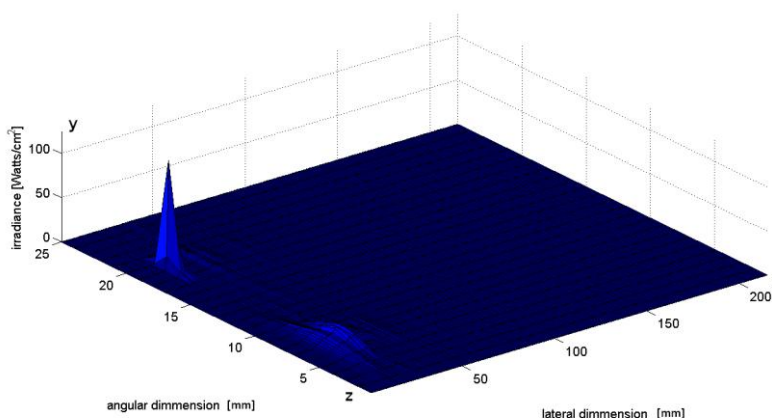
Graf 9.5 - Světelný výkon 5. fáze zvlnění



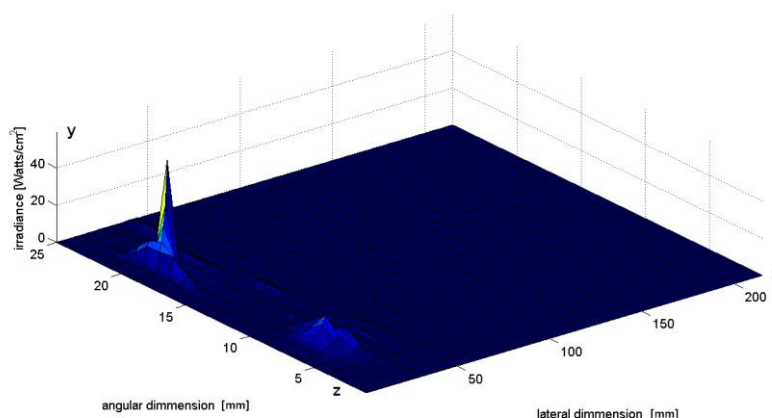
Graf 9.6 - Světelný výkon 6. fáze zvlnění



Graf 9.7 - Světelný výkon 7. fáze zvlnění



Graf 9.8 - Světelný výkon 8. fáze zvlnění



Graf 9.9 - Světelný výkon 9. fáze zvlnění

Z výše uvedených grafů vyplývá, že již u 4. fáze došlo k úplnému vyzáření vedených světelných paprsků. Skutečnost, že vyšší zvlnění neumožňuje optickým vláknům stranově vyzařovat, vede k závěru, že při zatkávání optických vláken by nemělo dojít k většímu zvlnění než je 3. fáze dle Novikova. Míra přípustného vlnění, je v závislosti s použitými indexy lomu vláken. Z optického zákona odrazu a lomu vyplývá, že pro větší rozdíl mezi indexy lomu pláště a jádra bychom mohli dosáhnout vedení světla i pro vyšší fáze dle Novikova.

Další závěr, který vyplývá ze simulací je, že pokud bude použita 1. fáze zvlnění tkaniny optické vlákno svítí do všech stran rovnoměrně. Pokud dojde ke zvlnění optického vlákna už jen do 2. fáze je světelná intenzita soustředěna převážně do vrcholů ohybu tudíž do horní a dolní části tkaniny nikoli do jejího boku.

## ZÁVĚR

Předložená diplomová práce je zaměřena na zkoumání stranově vyzařujících optických vláken v ohybu i v napřímeném stavu. Ohyby optických vláken vznikají téměř vždy, pokud jsou vlákna implementována do textilních výrobků. Práce předkládá návrhy metodiky měření světelné intenzity na povrchu optických vláken napřímených a optických vláken v ohybu.

Na základě získaných poznatků byly navrženy a zkonstruovány prototypy měřících zařízení. Pro měření světelné intenzity na povrchu napřímených optických vláken, bylo zařízení zkonstruováno ve spolupráci s Fakultou mechatroniky, informatiky a mezioborových technologií na Technické univerzitě v Liberci. Výhodou zařízení pro měření optických vláken v napřímeném stavu je, že umožňuje měřit, jaký vliv na světelnou intenzitu mají různé povrchové úpravy. Tyto druhy poškození jsou v diplomové práci podrobně popsány v rešeršní části.

Druhé zařízení bylo zkonstruováno dle vlastního návrhu a je určeno pro zkoumání makroohybových vlivů na světelnou intenzitu. Zařízení umožňuje sledovat, jaký vliv má předem definovaný rádius na světelnou intenzitu na povrchu vlákna v místě ohybu. Naměřené hodnoty na obou zařízeních potvrzují, že s rostoucím průměrem optického vlákna roste i světelná intenzita vyzařující povrchem vlákna. Dále lze z naměřených výsledků vyvodit, že vzniklý ohyb působí na světelnou intenzitu nejen v místě ohybu, ale v celém úseku, který následuje za ohybem.

Pro zkoumání vlivu mikroohybu vzniklého v textilních strukturách na světelnou intenzitu, byly zvoleny modely tkanin dle Novikovy předlohy. Ke zkoumání světelné intenzity ve tkanině bylo využito počítačových simulací vytvořených v programu Zemax. Simulace vznikly ve spolupráci s výzkumným ústavem Toptec v Turnově. Programu byly zadány předem definované parametry optického vlákna a základní optické vlastnosti. Simulace demonstruje výkon světelné intenzity na povrchu tkaniny. Výstupem simulací jsou grafy, ze kterých vyplývá, že čím více je vlákno zvlněno, tím více má negativní vliv na světelnou intenzitu celé tkaniny. Výsledky nám říkají, že není vhodné, aby optické vlákno dosáhlo většího zvlnění než 3. fáze dle Novikovy předlohy. Další závěr vyplývající ze simulací je ten, že pokud dojde ke stupni zvlnění 2. fáze a více, optické vlákno přestává svítit do boku tkaniny a svítí převážně ve směru oblouku.

Předkládaná diplomová práce s jednotlivými postupy měření a zkonstruovanými zařízeními je základem pro další možný výzkum průběhu světelné intenzity na povrchu optických vláken. Na základě získaných informací a zkušeností vznikla interní norma pro

měření světelné intenzity na katedře textilních technologií, která je v současné době předložena ke schválení.

**Seznam použité literatury**

- [1] FUKA J., HAVELKA B.: I. Optika fyzikální kompendium pro vysoké školy, díl IV., s. 845, Praha 1961
- [2] Encyklopedie fyziky, (nedatováno), získáno dne 15.června 2012, <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/440-uplny-odraz-svetla>
- [3] DOLEČEK J.: 3. Díl - Optoelektronika optoelektronické prvky a optická vlákna Praha 2005, ISBN 80-7300-184-5, listopad 2011
- [4] Obecné parametry používaných optických vláken, (nedatováno), získáno dne 16.března 2012, [www.comtel.cz/files/download.php?id=2320](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=2320)
- [5] KŘEMENÁKOVÁ D., MILITKÝ J.: Textilie v novém tisíciletí – využití optických vláken v textiliích (přednáška), Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010
- [6] BOHÁČ L.: Optické komunikace (přednáška), ČVUT v Praze, Praha, listopad 2011
- [7] JAROŠ, P., *Optické spoje a jejich vliv na přenos*, Brno 2011, s. , Bakalářská práce na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, Vedoucí bakalářské práce Vladimír Tejkal
- [8] BUBELA O.: *Plastová optická vlákna a jejich aplikace v praxi*, Brno 2010, s. 89, Bakalářská práce na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, Vedoucí bakalářské práce Šporik Jan
- [9] VAŠÍČEK V.: Měření optických vláken (přednáška), Ostrava: VŠB-TU v Ostravě, březen 2010
- [10] MERYOVÁ B.: *Textilní struktury z optických vláken*, Liberec 2010, s. 66, Bakalářská práce na fakultě Textilní Technické univerzity v Liberci, Vedoucí bakalářské práce Dana Křemenáková
- [11] PRAVDA I.: Metody měření útlumu optických vláken - Ukázka metody zpětného rozptylu (přednáška), Praha listopad 2010
- [12] Vysoká škola chemicko technologická, (nedatováno), získáno dne 1.ledna.2012, [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es001/hesla/rayleighova\\_rovnice\\_pro\\_rozptyl\\_svetla.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es001/hesla/rayleighova_rovnice_pro_rozptyl_svetla.html) ,

- [13] HÁJEK J.: Optická přenosová technika (přednáška), Praha: České vysoké učení technické v Praze, říjen 2010
- [14] KYSELÁK M.: *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy*, Brno 2008, s. 110 doktorská práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně
- [15] UHLÁŘ T.: *Aktivní monitoring optických přenosových tras*, Praha 2005, s.15, semestrální úloha, Praha: Vysoké učení technické v Praze,
- [16] LHOTA M.: *Mechanické namáhání optických vláken- Ohybové ztráty v zakřiveném optickém vlákně*, s. 22, Praha: České učení technické v Praze, , 2005
- [17] MARŠÁLEK L.: *Optická vlákna*, verze 2.1.3., s 172, Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2006
- [18] AZADEH M.: *Fiber Optics Engineering*, Springer, Dordrecht 2009
- [19] MATTHEWSON M.J., KURKJIAN C.R., GULATI S.T. Journal of the American Ceramic Society, 69: 815-821 (1986)
- [20] Min Ho Im, Eun Ju Park, Chang Heon Kim, Moo Sung Lee, *Modification of Plastical Fiber for Side- Illumination*, s.6 Sourth Korea
- [21] MERCHANT D.F., SCULLY P.J., SCHMITT N.F.: *Chemical tapering of polymer optical fiber*, s. 6, Liverpool, 13. November 1998
- [22] SHUKLA A.- *Dyeing of optical fibers by surface modifications and its side-emitting ability*, s.46, dissertation Faculty of Textile at the Technical University of Liberec, supervizor Rajesh Misra
- [23] KŘEMENÁKOVÁ D., MERYOVÁ B.: Závěrečná zpráva 2011 k projektu FR-TII/242 – Opticky aktivní bezpečnostní textilíí, Příloha 6: *Vytvořit systém simulace podmínek údržby a užití pro hodnocení stability prototypů textilních struktur pro opticky aktivní bezpečnostní textilie*, Liberec: Technická univerzita v Liberci, Katedra textilních technologií leden 2012
- [24] Interní norma č. 13-108-01/01: Definice geometrické parametry tkaniny, Liberec: Technická univerzita v Liberci, dne 7.7.2004

- [25] DRAŠAROVÁ J.: *Analýza příčných řezů tkaniny*, s. 19, Teze disertační práce, Liberec : Technická univerzita v Liberci, školitel : Bohuslav Neckář
- [26] BEJČEK L., ŠEDIVÁ S.: *Vláknová optika- návod do laboratorních cvičení*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, říjen 2003
- [27] NOVOTNÝ, F.: *Základy robotiky (přednáška)*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, duben 2010.
- [28] Vysoká škola chemicko technologická,(nedatováno), získáno dne 15.dubna, <http://lms.vscht.cz/Zverze/Infrared.htm>
- [29] Interní materiály Katedry textilních technologií, Fakulty textilní, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012
- [30] KŘEMENÁKOVÁ D., MERYOVÁ B.: Závěrečná zpráva 2010 k projektu FR-TII/242 – Opticky aktivní bezpečnostní textilií, Příloha 1: Testování intenzity vyzařování optických vláken, Liberec:Technická univerzita v Liberci, Katedra textilních technologií leden 2011
- [31] KŘEMENÁKOVÁ D., MERYOVÁ B.: Závěrečná zpráva 2011 k projektu FR-TII/242 – Opticky aktivní bezpečnostní textilií, Příloha 1: Ověření účinnosti různých technik umožňujících stranové vyzařování pro vybrané typy komerčních polymerních optických vláken vhodných pro textilní zpracování, Liberec:Technická univerzita v Liberci, Katedra textilních technologií leden 2012

**Seznam symbolů a zkratk**

A	[mm]	velikost rozteče nití
$A_e$	[ $\mu\text{m}$ ]	amplituda světelného pole
c	[m/s]	rychlost šíření světla
d	[-]	relativní rozdíl mezi indexy lomu jádra a pláště
$d_o$	[pn/10 cm]	dostava osnovy
$d_u$	[pn/10 cm]	dostava útku
$e_o$	[%]	míra zvlnění osnovy
$e_u$	[%]	míra zvlnění útku
$F(\Theta)$	[1]	funkce úhlu pozorování
HM	[-]	horní mez 95 % konfidenčního intervalu
$h_o$	[mm]	výška zvlnění osnovní nitě
$h_u$	[mm]	výška zvlnění útkové nitě
IR	[nm]	ultrafialové záření
$i_\theta$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita světla rozptýleného jednou částicí (molekulou)
$I_0$	[W/m <sup>2</sup> ]	celková světelná intenzita dopadajícího světla
$K_o$	[m <sup>-1</sup> ]	vlnové číslo
l	[mm]	vzdálenost snímače
n	[-]	index lomu
$n_1$	[-]	index lomu 1. prostředí
$n_2$	[-]	index lomu 2. prostředí
$n_{12}$	[-]	relativní index lomu
$N_C$	[°]	kritický úhel
P	[W]	výkon světelné intenzity
$P_Z$	[W]	vyzařovaný výkon světelné intenzity ve vzdálenosti z od zdroje
$P_0$	[W]	vyzařovaný výkon světelné intenzity ve vzdálenosti 0 od zdroje
r	[mm]	poloměr vlákna
R	[ $\mu\text{m}$ ]	kritický poloměr pro jednovidová vlákna
$R_b$	[mm]	poloměr ohybu
$R_K$	[ $\mu\text{m}$ ]	kritický poloměr ohybu mnohavidového vlákna
SM	[-]	spodní mez 95 % konfidenčního intervalu
U	[-]	typ zkoumaného vidu
UV	[nm]	ultrafialové záření



$\dot{U}_D$	[dB]	útlum světelné intenzity podle metody dvou délek
$\dot{U}_V$	[dB]	útlum světelné intenzity podle metody vložených ztrát
$v$	[m/s]	rychlost šíření světla ve vakuu
$V$	[Hz]	normovaný kmitočet
$W$	[1]	normalizovaný parametr úbytku výkonu pro plášť
$z$	[mm]	vzdálenost místa měření světelné intenzity od zdroje světla
$\alpha$	[dB/km]	součinitel útlumu světelné intenzity
$\alpha_m$	[°]	mezní úhel dopadu
$\alpha_o$	[dB]	útlum pro mikrostrukturní vlákna
$\gamma$	[°]	úhel v místě ohybu vlákna
$\epsilon_0$	[C <sup>2</sup> .J <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> ]	permitivita vakua ( $8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ J}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )
$\lambda$	[μm]	vlnová délka světla
$\lambda_C$	[μm]	mezní vlnová délka světla
$\theta$	[°]	mezní úhel
$\varphi$	[°]	úhel zvlnění
PES		polyester
PMMA		polymetylmetakrylát

### Seznam obrázků

Obr. 1	Princip odrazu světla v závislosti na úhlu dopadu (11)
Obr. 2	Rozložení paprsku způsobené přechodem z $n_1 > n_2$ (12)
Obr. 3	Schéma normální disperze (12)
Obr. 4	Uspořádání optických vláken (14)
Obr. 5	Jednovidové optické vlákno (15)
Obr. 6	Optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu (16)
Obr. 7	Optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu (16)
Obr. 8	Metoda vložených ztrát (18)
Obr. 9	a) vid v napřímeném vlákně, b) vid při ohybu vlákna (22)
Obr. 10	Ztráty ohybem pro mikrostrukturní optická vlákna (23)
Obr. 11	Přenos světla v závislosti na úhlu ohybu, poloměr ohybu 4 mm (23)
Obr. 12	Mikroohyb způsobený při výrobě (24)
Obr. 13	Mikroohyb vlákna (25)
Obr. 14	Mikroohyb způsobený implementací do tkaniny (25)

Obr. 15	Mechanická poškození povrchu vláken (26)
Obr. 16	Různá poškození vláken (27)
Obr. 17	Zužování optického vlákna (28)
Obr. 18	Obarvené optické vlákno (28)
Obr. 19	Nerovnoměrné poškození optického vlákna (29)
Obr. 20	poškození optického vlákna laserem (29)
Obr. 21	Termické poškození (30)
Obr. 22	Pierceův model provázání (31)
Obr. 23	Devět fází provázání, odstupňovaných podle míry zvlnění osnovní a útkové nitě podle Novikova (32)
Obr. 24	a) ideální kruh b) deformace ve tvaru elipsy (33)
Obr. 25	Průběh zkoušky mikroohybu (35)
Obr. 26	Optické vlákno bez mikroohybu (35)
Obr. 27	Optické vlákno s mikroohybem (36)
Obr. 28	Mikroohyb způsobený jinou soustavou nití (36)
Obr. 29	Navíjecí metoda (37)
Obr. 30	Čtvrtkruhová metoda (37)
Obr. 31	Reflexní taška od firmy Stap a.s. (38)
Obr. 32	Stranově vyzařující optická vlákna všitá na tkaninu (38)
Obr. 33	Lab Master Ultima (39)
Obr. 34	Zařízení pro měření světelné intenzity napřímených optických vláken (40)
Obr. 35	Zařízení pro měření intenzity světla v ohybu vlákna č. 1 (41)
Obr. 36	Zařízení pro měření intenzity světla v ohybu vlákna č. 2 (42)
Obr. 37	Zařízení pro měření intenzity světla v ohybu vlákna č. 3 (43)
Obr. 38	Odštípnutí osvětlovací plochy (46)
Obr. 39	Zařízení pro lineární vedení optických vláken (47)
Obr. 40	Ovládací programová tabulka (48)
Obr. 41	Zařízení pro měření světelných ztrát v ohybu (49)
Obr. 42	a) Výsledky FTIR obalu Grace b) Výsledky FTIR obalu Hypoff (51)
Obr. 43	a) Výsledky FTIR jádra Grace b) Výsledky FTIR jádra Hypoff (51)
Obr. 44	Schéma postupu měření (56)
Obr. 45	Modely zvlnění nitě ve tkanině vytvořené v programu Inventor (61)
Obr. 46.1	Simulace 2. fáze zvlnění, pohled na model z vrchu (63)

Obr. 46.2	Simulace 1. fáze zvlnění (63)
Obr. 47.1	Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 1. fázi dle Novikova
Obr. 47.2	Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 2. fázi dle Novikova
Obr. 47.3	Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 3. fázi dle Novikova
Obr. 47.4	Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 4. fázi dle Novikova
Obr. 47.5	Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 5. fázi dle Novikova
Obr. 47.6	Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 6. fázi dle Novikova
Obr. 47.7	Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 7. fázi dle Novikova
Obr. 47.8	Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 8. fázi dle Novikova
Obr. 47.9	Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 9. fázi dle Novikova

### **Seznam tabulek**

Tab. 1	Výsledky rozhodovací analýzy (str. 45)
Tab. 2	Párový test významnosti (str. 45)
Tab. 3	Velikost rádiusů zvolených kotoučů (str. 50)
Tab. 4	Výsledné hodnoty $\alpha$ a $P_0$ (54)

### **Seznam grafů**

Graf 1	Měření světelné intenzity metodou dvou délek (str. 17)
Graf 2	Vliv poškození povrchu optického vlákna (str. 30)
Graf 3	Porovnání světelné intenzity různých průměrů optických vláken (str. 52)
Graf 4.1	Porovnání statistické významnosti naměřených dat od výrobce Hypoff (str. 53)
Graf 4.2	Porovnání statistické významnosti naměřených dat
Graf 5	Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu (str. 54)
Graf 6.1	Vyhlazené hodnoty světelné intenzity (str. 55)
Graf 6.2	Exponenciální a vyhlazená křivka světelné intenzity (str. 55)
Graf 7.1	Světelný výkon Grace 0,75 při různých rádiusech (str. 57)
Graf 7.2	Světelný výkon Grace 1 při různých rádiusech (str. 57)
Graf 7.3	Světelný výkon Hypoff 1,2 při různých rádiusech (str. 58)
Graf 7.4	Světelný výkon Hypoff 1,5 při různých rádiusech (str. 58)
Graf 8.1	Světelný výkon při rádiusu 175 mm (str. 59)

Graf 8.2	Světelný výkon při rádiu 100 mm (str. 59)
Graf 8.3	Světelný výkon při rádiu 20 mm (str. 59)
Graf 9.1	Světelný výkon 1. fáze zvlnění (str. 64)
Graf 9.2	Světelný výkon 2. fáze zvlnění (str. 64)
Graf 9.3	Světelný výkon 3. fáze zvlnění (str. 64)
Graf 9.4	Světelný výkon 4. fáze zvlnění (str. 65)
Graf 9.5	Světelný výkon 5. fáze zvlnění (str. 65)
Graf 9.6	Světelný výkon 6. fáze zvlnění (str. 65)
Graf 9.7	Světelný výkon 7. fáze zvlnění (str. 66)
Graf 9.8	Světelný výkon 8. fáze zvlnění (str. 66)
Graf 9.9	Světelný výkon 9. fáze zvlnění (str. 66)
Graf 10.1	Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Grace 0,5 mm
Graf 10.2	Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Grace 0,75 mm
Graf 10.3	Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Grace 1 mm
Graf 10.4	Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Hypoff 1 mm
Graf 10.5	Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Hypoff 1,2 mm
Graf 10.6	Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Hypoff 1,5 mm
Graf 11.1	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna G. 0,75 mm o rádiu 175 mm
Graf 11.2	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna G. 1 mm o rádiu 175 mm
Graf 11.3	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna H. 1,2 mm o rádiu 175 mm
Graf 11.4	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna H. 1,5 mm o rádiu 175 mm
Graf 12.1	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna G. 0,75 mm o rádiu 100 mm
Graf 12.2	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna G. 1 mm o rádiu 100 mm
Graf 12.3	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna H. 1,2 mm o rádiu 100 mm
Graf 12.4	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna H. 1,5 mm o rádiu 100 mm
Graf 13.1	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna G. 0,75 mm o rádiu 20 mm
Graf 13.2	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna G. 1 mm o rádiu 20 mm
Graf 13.3	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna H. 1,2 mm o rádiu 20 mm
Graf 13.4	Světelná intenzita ohnutého optického vlákna H. 1,5 mm o rádiu 20 mm
Graf 14.1	Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Grace 0,5 mm
Graf 14.2	Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Grace 0,75 mm
Graf 14.3	Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Hypoff 1 mm
Graf 14.4	Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Hypoff 1,2 mm

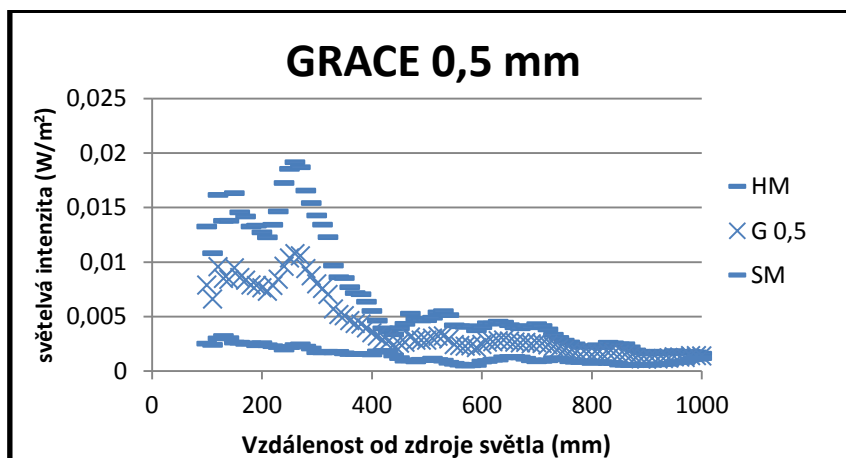
Graf 14.5      Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Hypoff 1,5 mm

### **Seznam příloh**

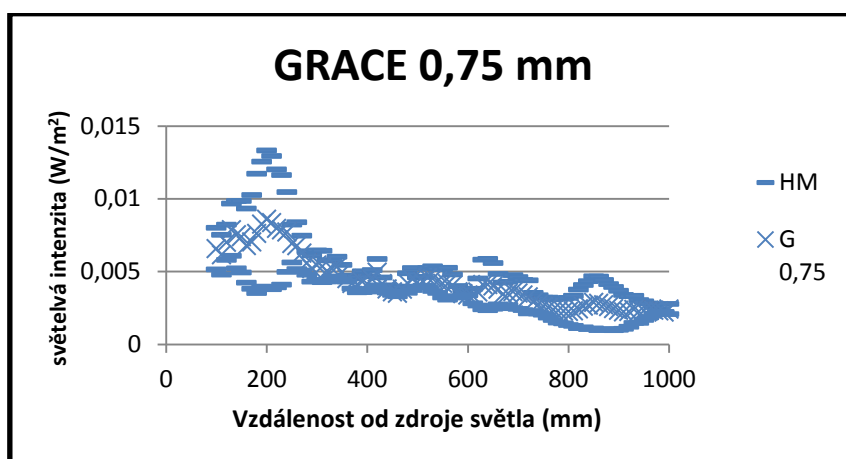
PŘÍLOHA 1	Grafy světelní intenzity optických vláken v napřímeném stavu
PŘÍLOHA 2	Grafy světelní intenzity optických vláken v ohnutém stavu
PŘÍLOHA 3	Lineární regrese
PŘÍLOHA 4	Výsledky simulací světelné intenzity ve tkanině

## PŘÍLOHA 1

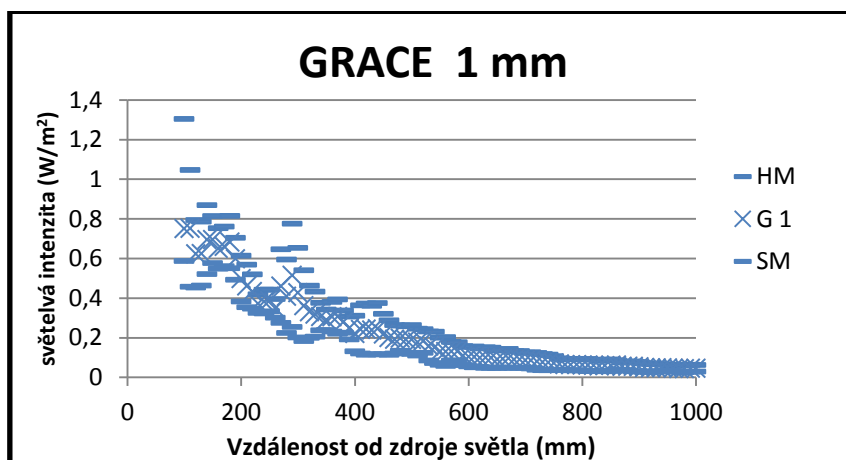
### SVĚTELNÁ INTENZITA NAPŘÍMENÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN OD FIRMY GRACE



Graf 10.1 Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Grace 0,5 mm

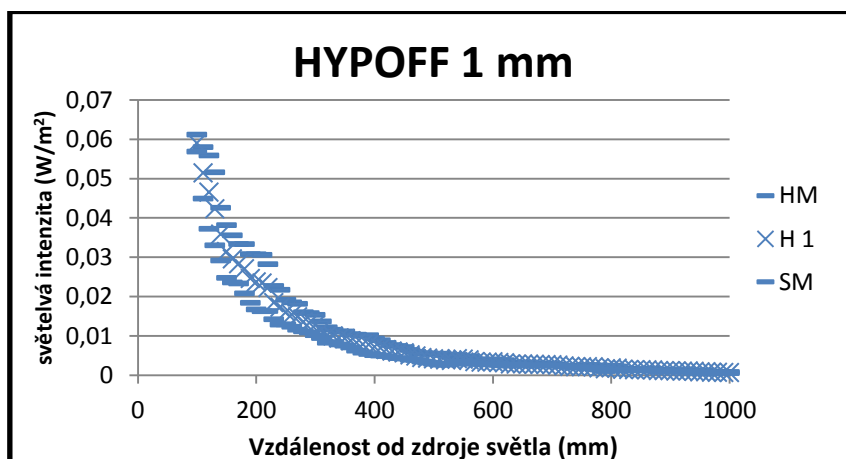


Graf 10.2 Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Grace 0,75 mm

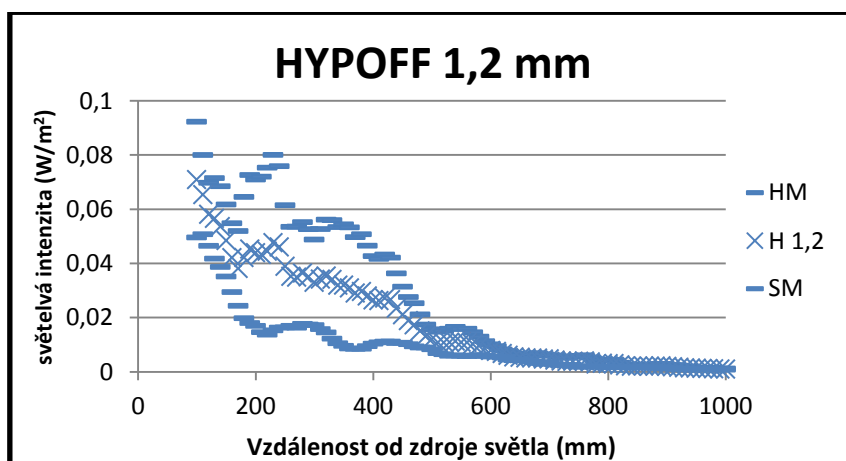


Graf 10.3 Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Grace 1 mm

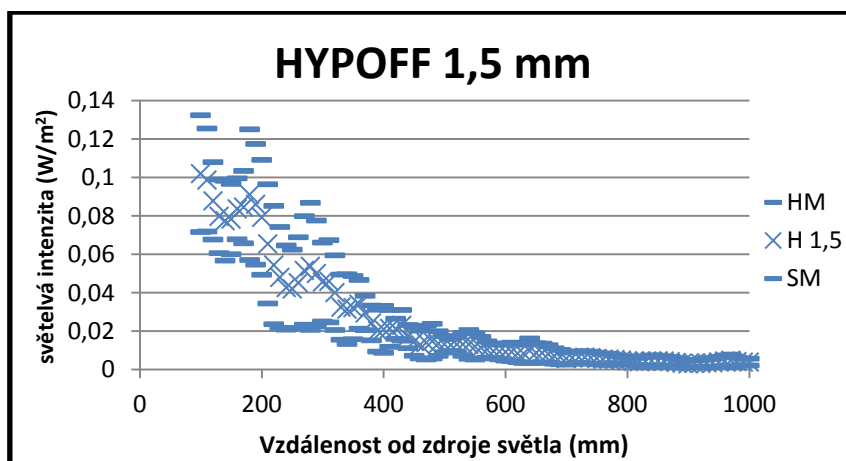
## SVĚTELNÁ INTENZITA NAPŘÍMENÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN OD FIRMY HYPOFF



Graf 10.4 Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Hypoff 1 mm



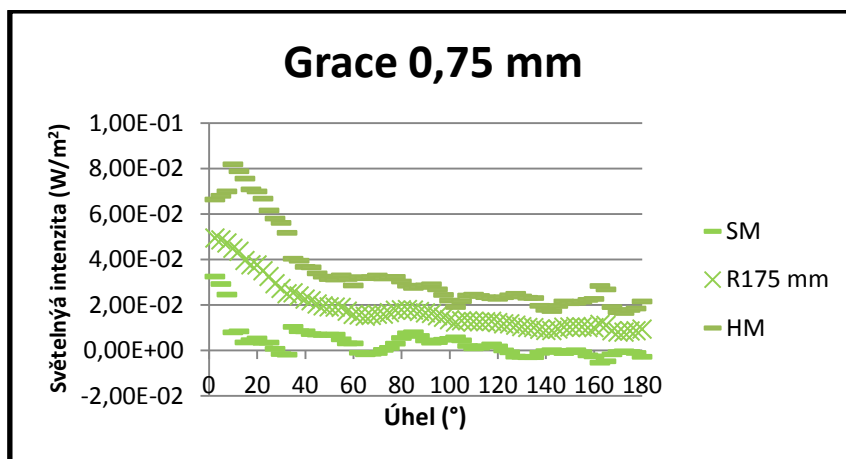
Graf 10.5 Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Hypoff 1,2 mm



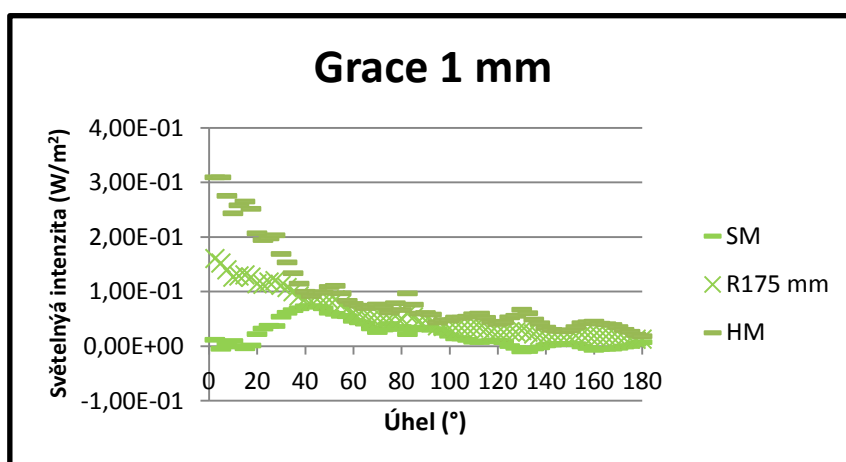
Graf 10.6 Světelná intenzita napřímeného optického vlákna Hypoff 1,5 mm

## PŘÍLOHA 2

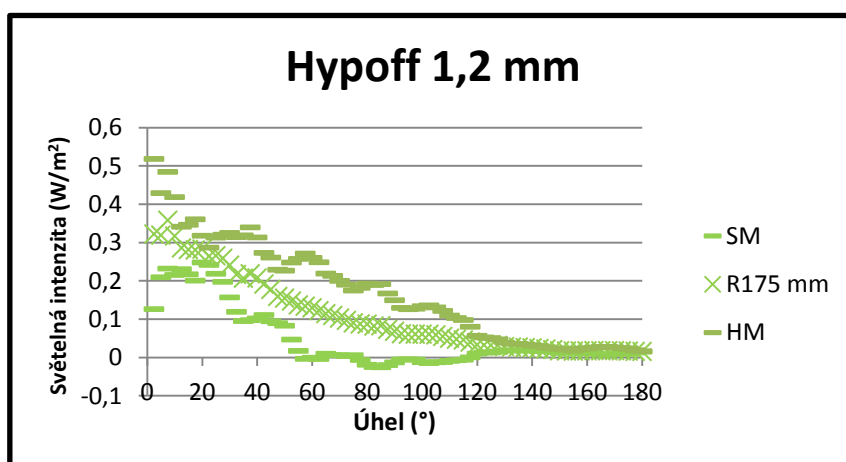
### SVĚTELNÁ INTENZITA OHNUTÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN O RÁDIUSU 175 mm



Graf 11.1 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Grace 0,75 mm o rádiu 175 mm

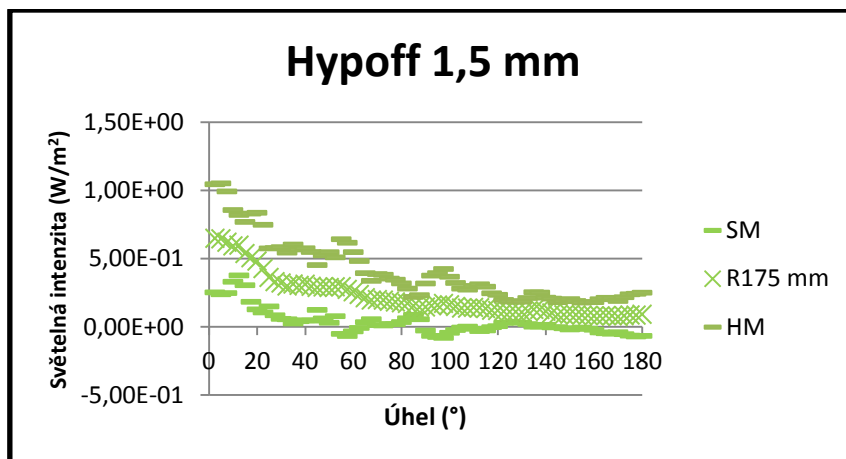


Graf 11.2 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Grace 1 mm o rádiu 175 mm



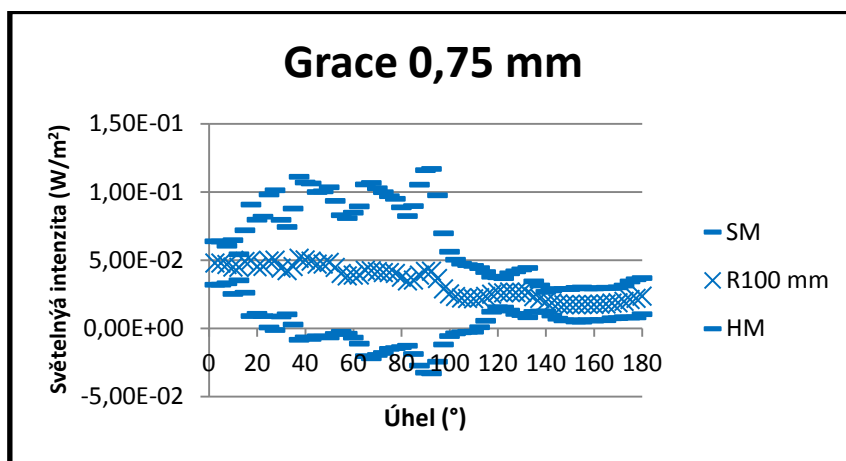
Graf 11.3 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Hypoff 1,2 mm o rádiu 175 mm



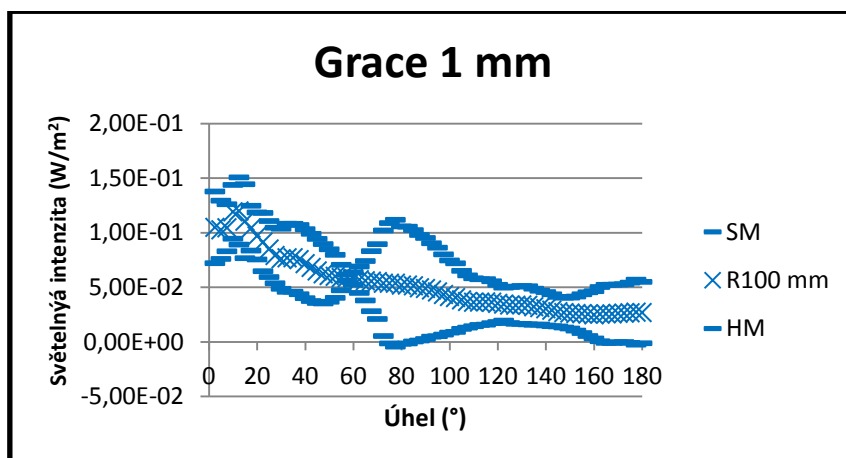


Graf 11.4 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Hypoff 1,5 mm o rádiusu 175 mm

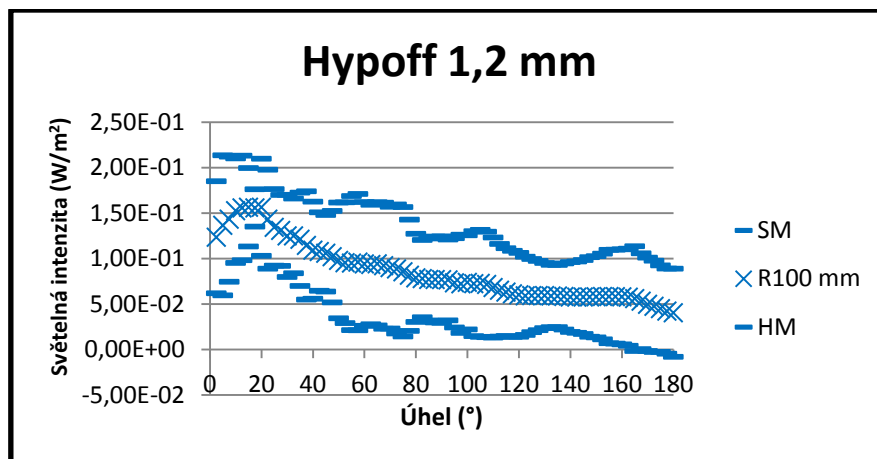
### SVĚTELNÁ INTENZITA OHNUTÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN O RÁDIUSU 100 mm



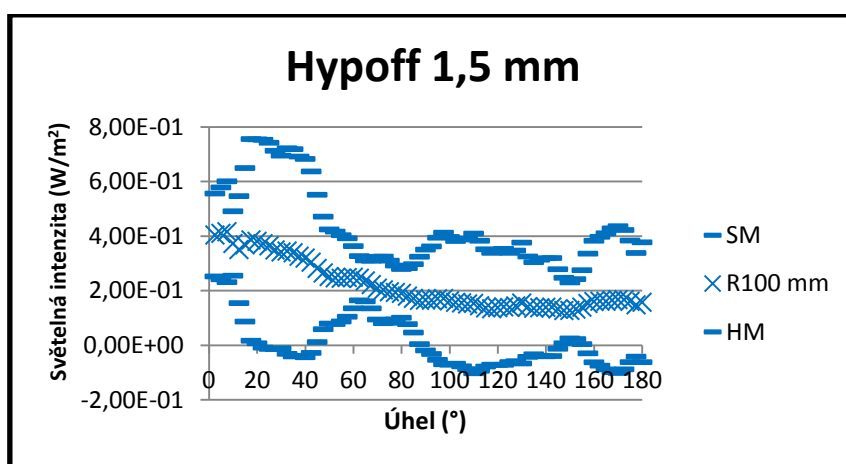
Graf 12.1 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Grace 0,75 mm o rádiusu 100 mm



Graf 12.2 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Grace 1 mm o rádiusu 100 mm

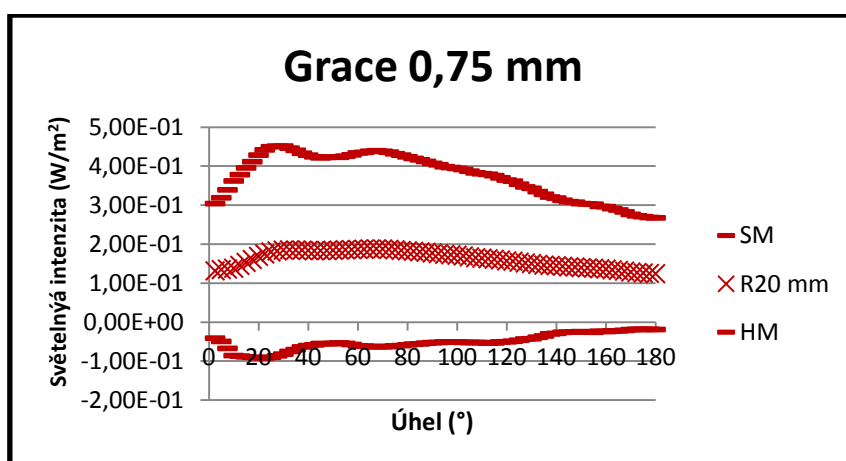


Graf 12.3 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Hypoff 1,2 mm o rádiu 100 mm

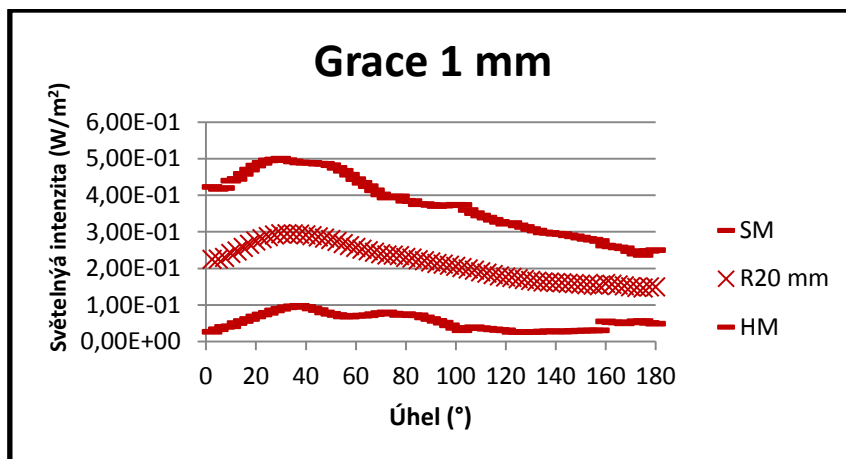


Graf 12.4 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Hypoff 1,5 mm o rádiu 100 mm

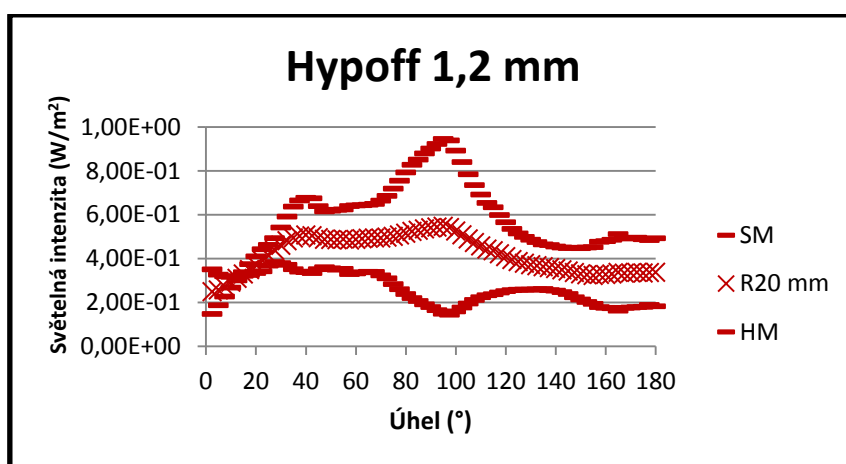
### SVĚTELNÁ INTENZITA OHNUTÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN O RÁDIUSU 20 mm



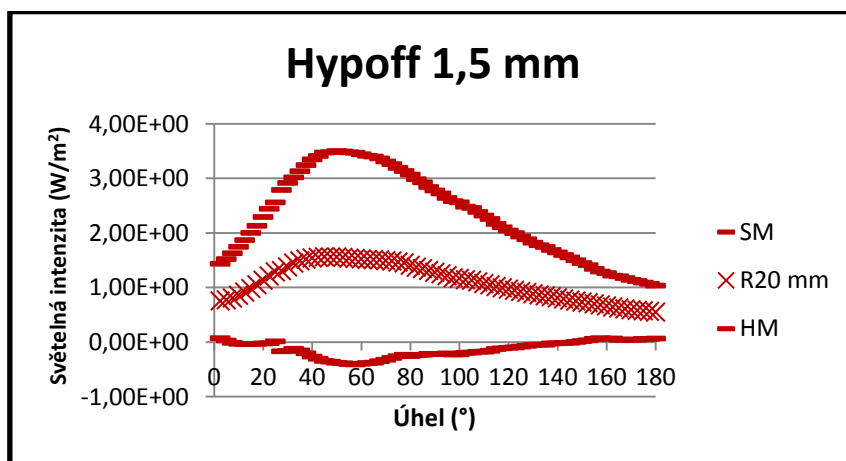
Graf 13.1 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Grace 0,75 mm o rádiu 20 mm



Graf 13.2 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Grace 1 mm o rádiusu 20 mm



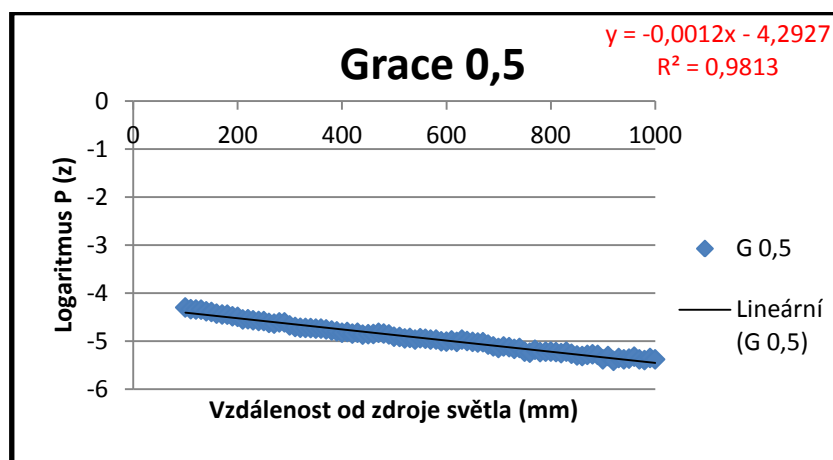
Graf 13.4 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Hypoff 1,2 mm o rádiusu 20 mm



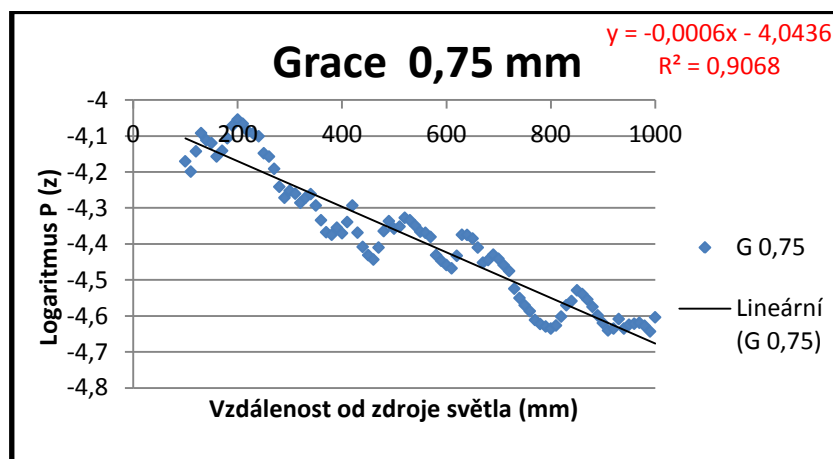
Graf 13.4 Světelná intenzita ohnutého optického vlákna Hypoff 1,5 mm o rádiusu 20 mm

## PŘÍLOHA 3

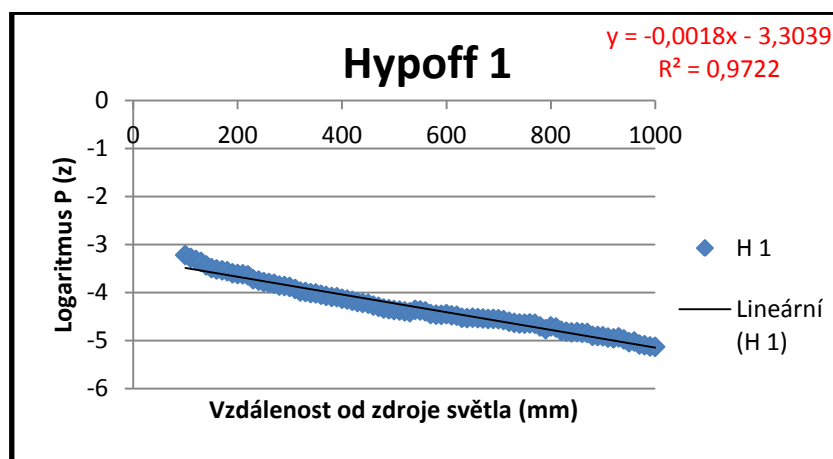
### LINEÁRNÍ REGRASE



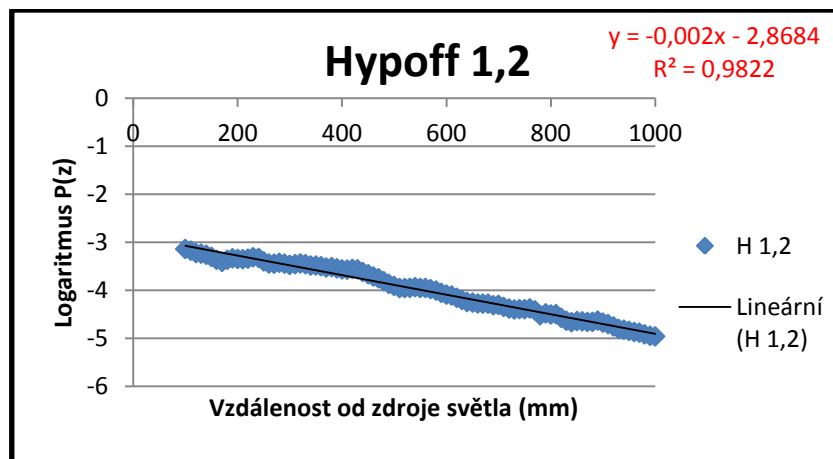
Graf 14.1 Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Grace 0,5 mm



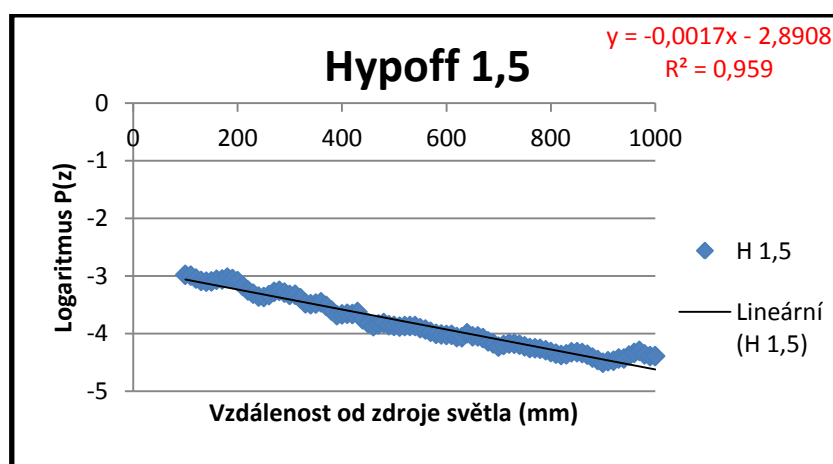
Graf 14.2 Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Grace 0,75 mm



Graf 14.3 Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Hypoff 1 mm



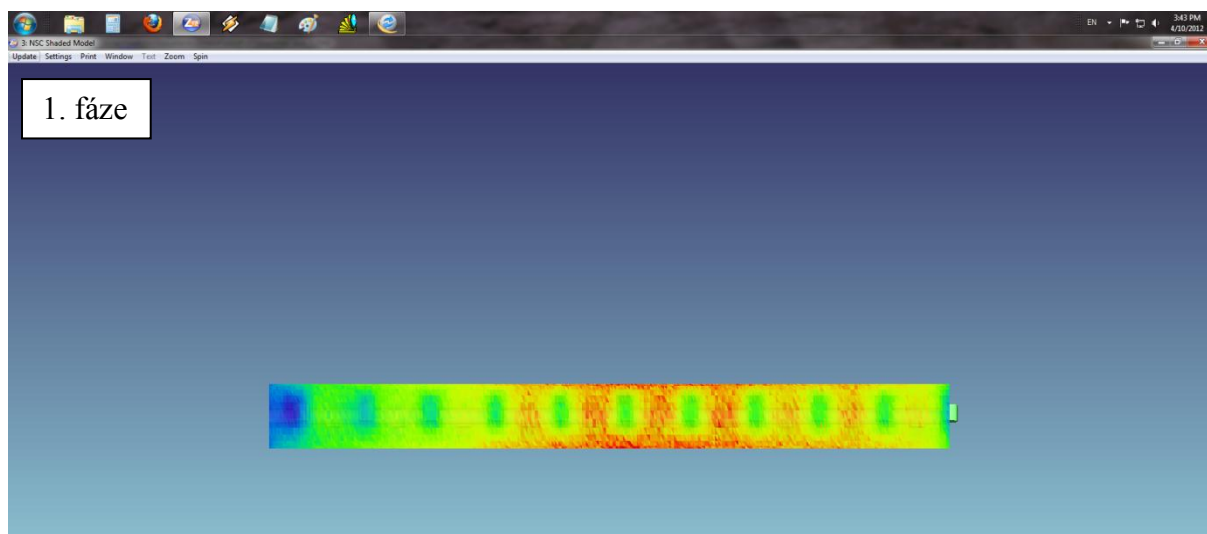
Graf 14.4 Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Hypoff 1,2 mm



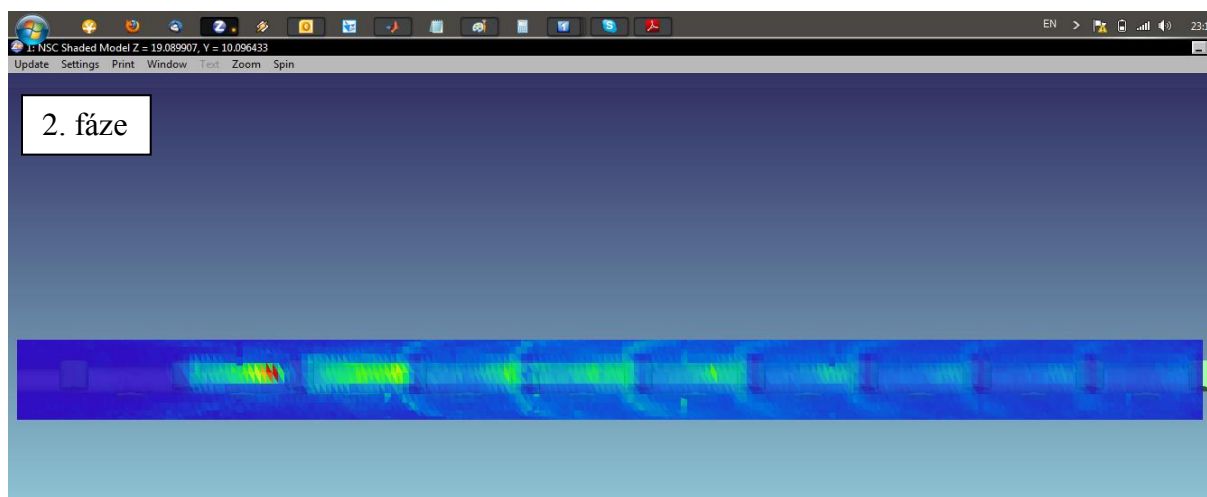
Graf 14.5 Lineární regrese pro stanovení parametrů útlumu Hypoff 1,5 mm

## PŘÍLOHY 4

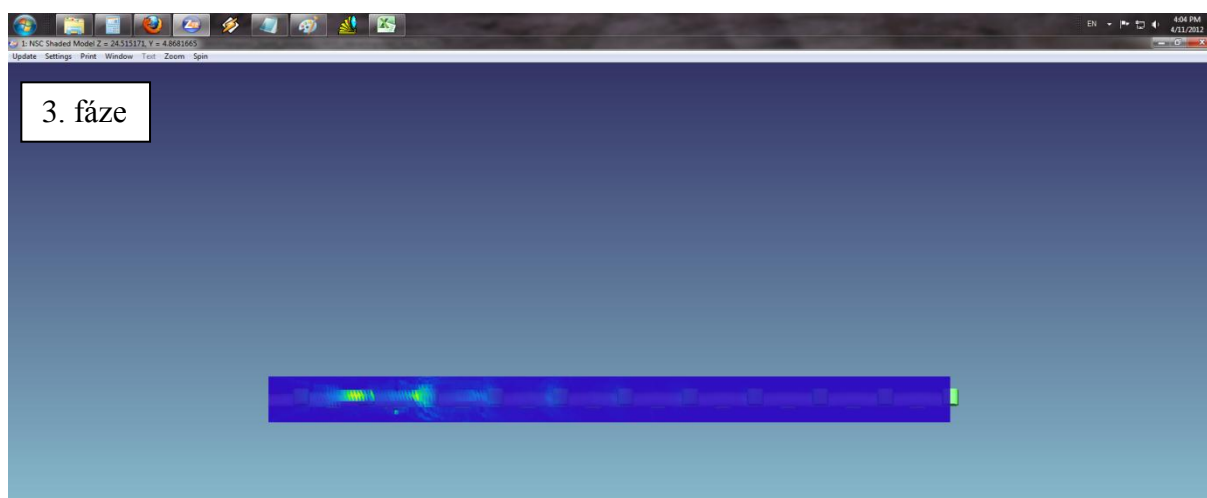
### SIMULACE SVĚTELNÉ INTENZITY PRO RŮZNÁ ZVLNĚNÍ VE TKANINĚ



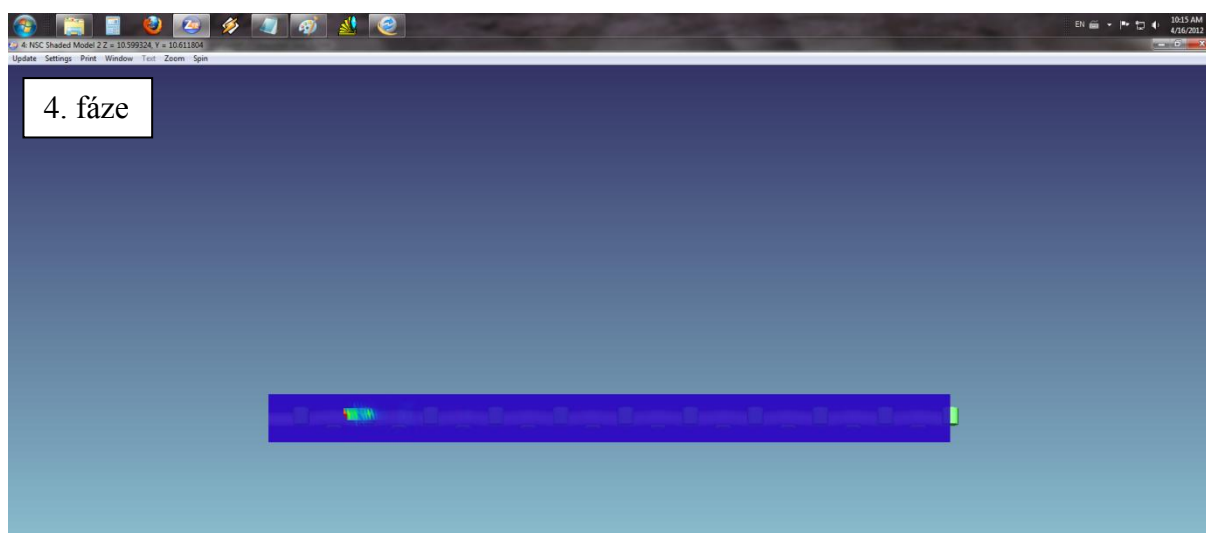
Obr. 47.1 Simulace světelné intenzity tkaniny zvlněné v 1. fázi dle Novikova



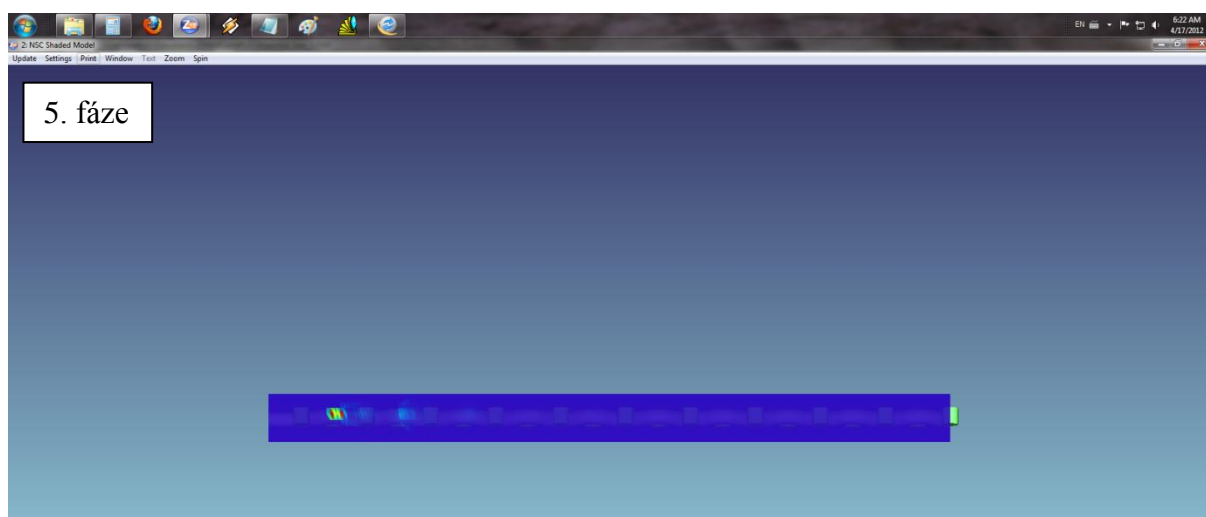
Obr. 47.2 Simulace světelné intenzity tkaniny zvlněné v 2. fázi dle Novikova



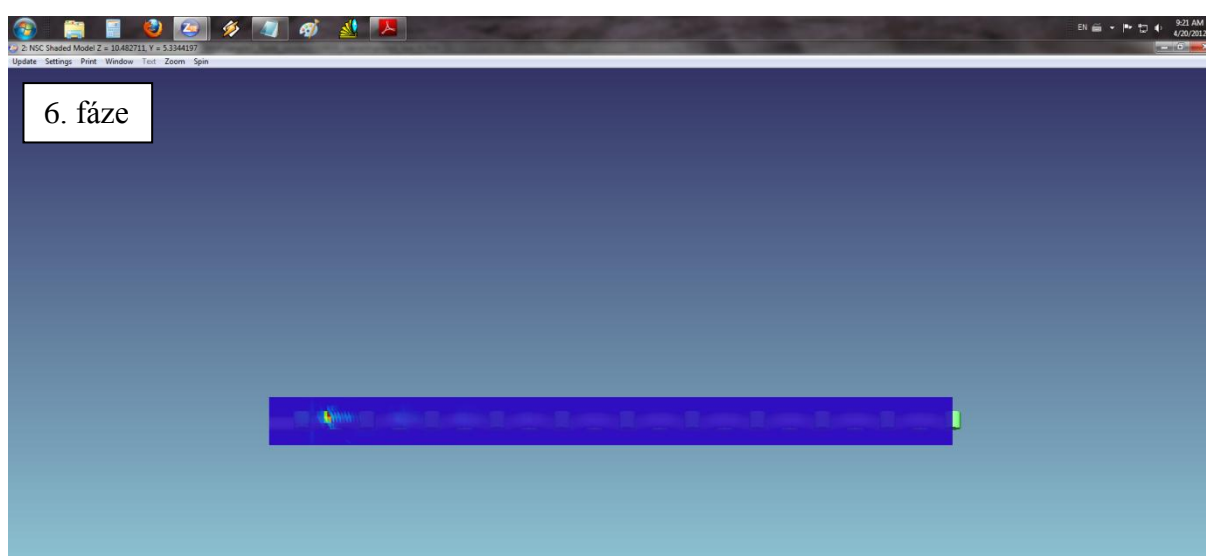
Obr. 47.3 Simulace světelné intenzity tkaniny zvlněné v 3. fázi dle Novikova



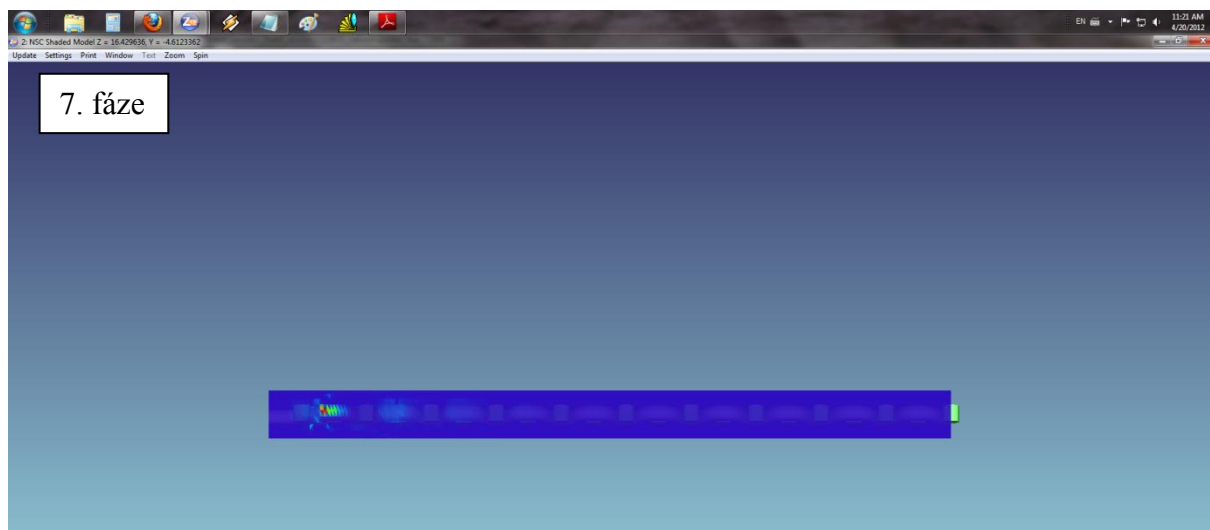
Obr. 47.4 Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 4. fázy dle Novikova



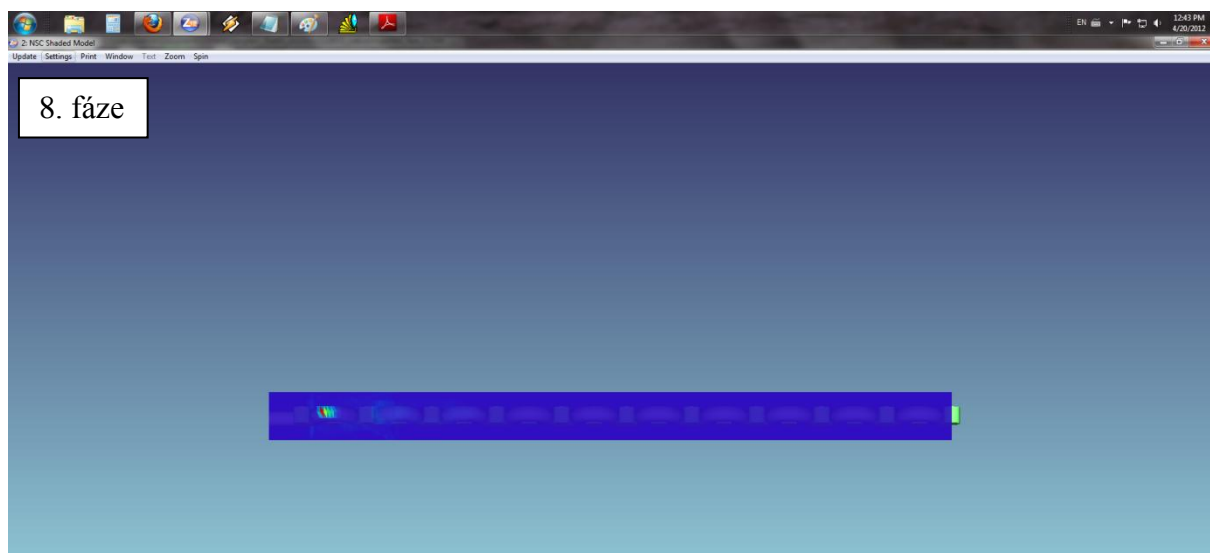
Obr. 47.5 Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 5. fázy dle Novikova



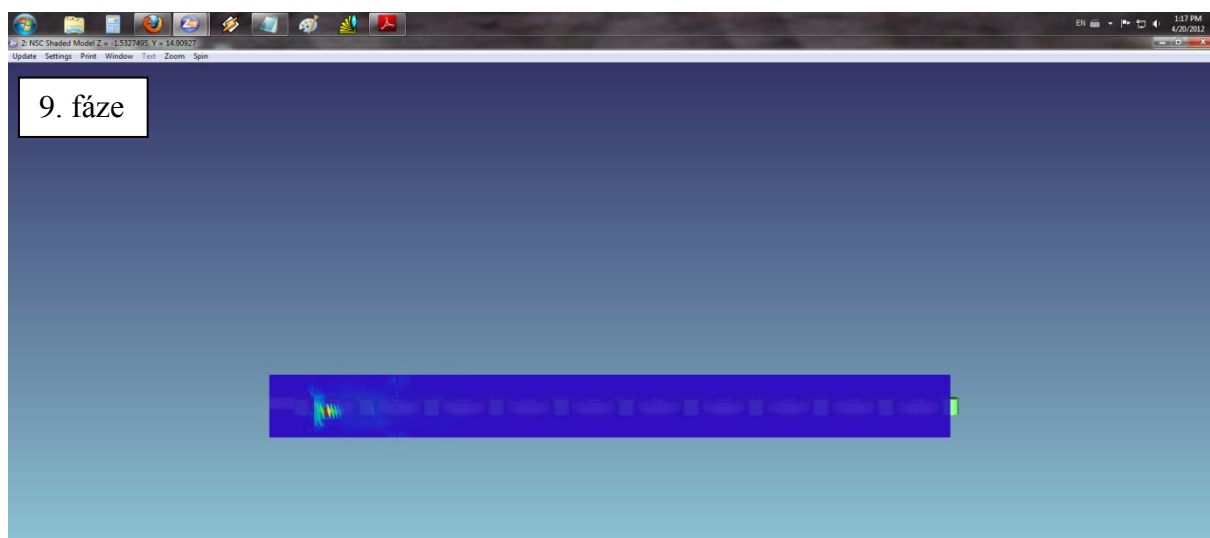
Obr. 47.6 Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 6. fázy dle Novikova



Obr. 47.7 Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 7. fázi dle Novikova



Obr. 47.8 Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 8. fázi dle Novikova



Obr. 47.9 Simulace světelní intenzity tkaniny zvlněné v 9. fázi dle Novikova



